

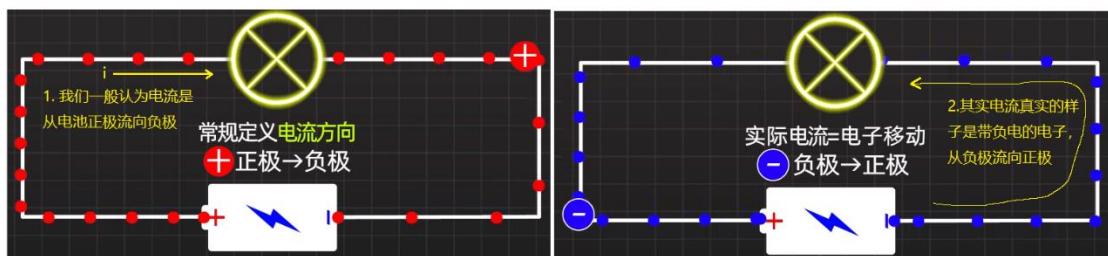
# 电池技术与硬件开发指南

作者：向仔州

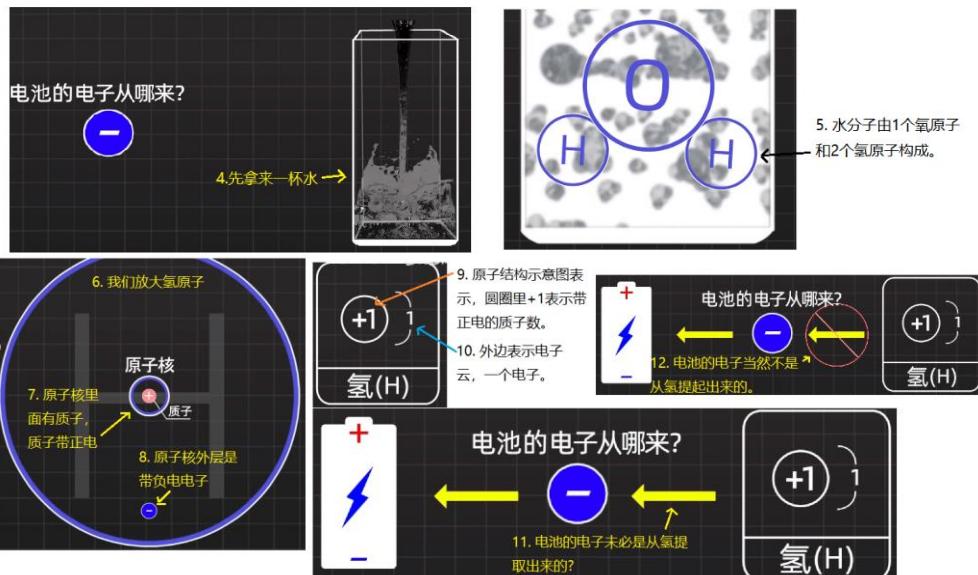
## 目录

<b>电池是怎么来的?</b>	2
<b>伏打电堆结构</b>	9
<b>电池选型概念讲解</b>	11
<b>电池能量密度理解</b>	12
<b>电池组漏电检测方法</b>	13
新能源汽车电池绝缘性能测试	14
使用万用表测量电池组绝缘性能	14
使用兆欧表测量电池组绝缘性能	16
<b>电池性能检测</b>	18
<b>电池直流内阻测试电路设计</b>	22
为什么选择 1khz 测试频率测量电池内阻?	27
简单的直流测电池方式测量内阻	28
标准做法用交流测量电池内阻	29
<b>电池绝缘电阻检测</b>	30
不平衡电桥测量电池绝缘电阻的实际应用	33
不平衡电桥测量电池绝缘电阻仿真	38
<b>电池保护板原理</b>	43
电池组串并联存在的隐患	43
电池组均流拓扑讲解	45
电池组均流电路实现	49
<b>电池保护板电路(带平衡保护功能)</b>	52
磷酸铁锂低成本充电电路	53
<b>充电电路方案</b>	54
充放电电路分离元件设计	54
蓄电池放电保护电路	55
TL431 锂电池充电保护电路	56
TL431 锂电池放电保护电路	58
锂电池边充电边使用电路实现	58
<b>电池 SOC, SOE, SOH 区别</b>	59
锂电池 SOC 计算方法(安时积分法)	60
锂电池 SOC 计算方法(安时积分法+开路电压法)实际应用	61
锂电池 SOC 计算方法(无迹卡尔曼滤波法)	64
无迹卡尔曼滤波电池电量 SOC 检测 C 语言实现	65

## 电池是怎么来的?



3. 电池是为什么能持续让电子自动的从负极流向正极呢?



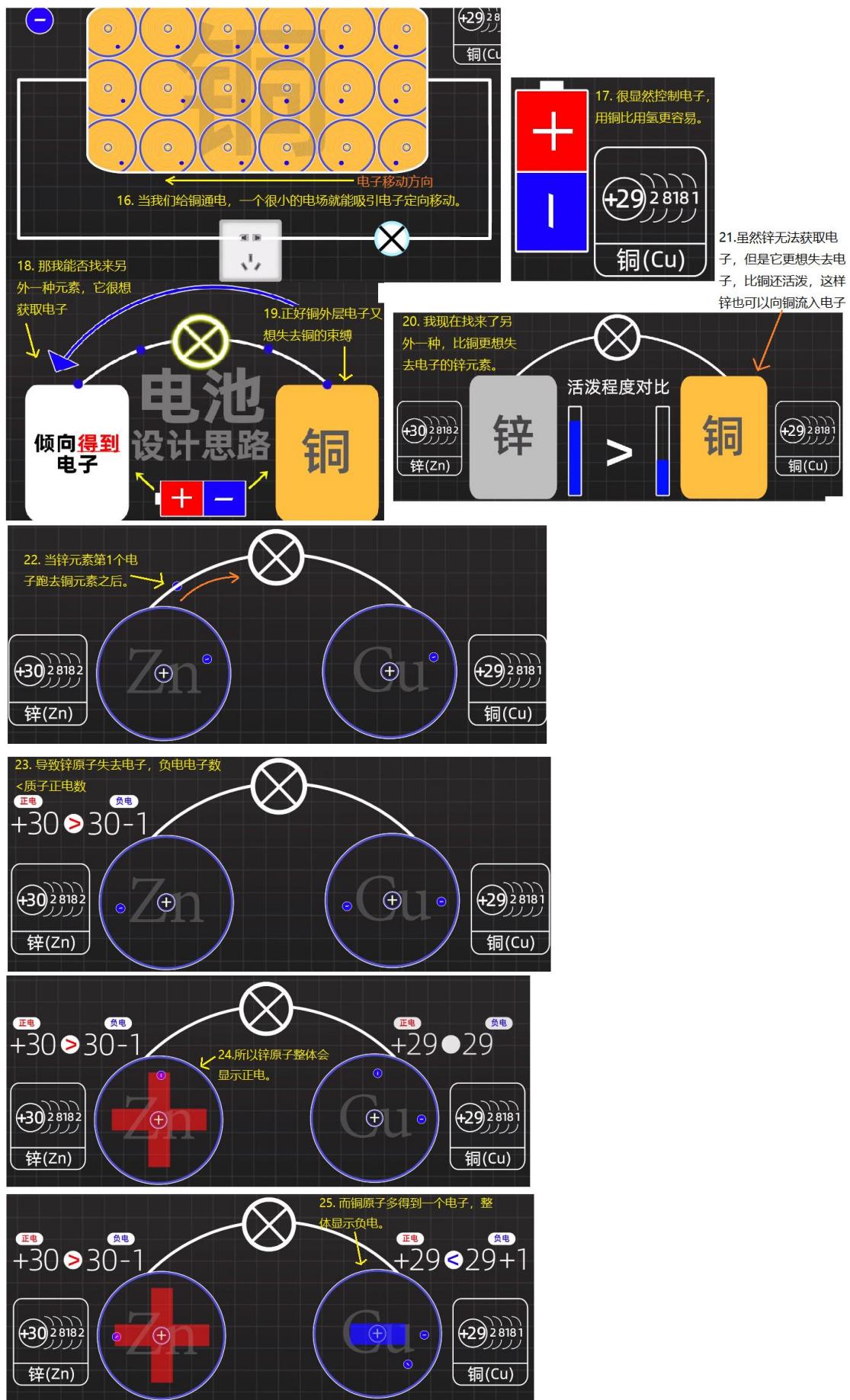
13. 自然界大多数元素都有电子存在。

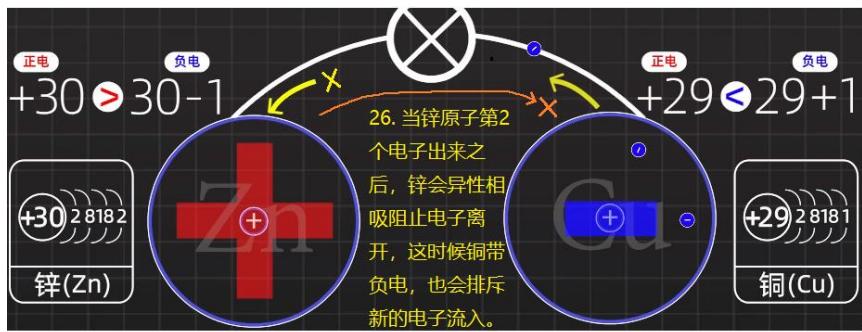
第一周期	1 H 							2 He 
第二周期	3 Li 	4 Be 	5 B 	6 C 	7 N 	8 O 	9 F 	10 Ne 
第三周期	11 Na 	12 Mg 	13 Al 	14 Si 	15 P 	16 S 	17 Cl 	18 Ar 

14. 不同的元素会有多层电子,比如锂元素,钠元素,铜元素

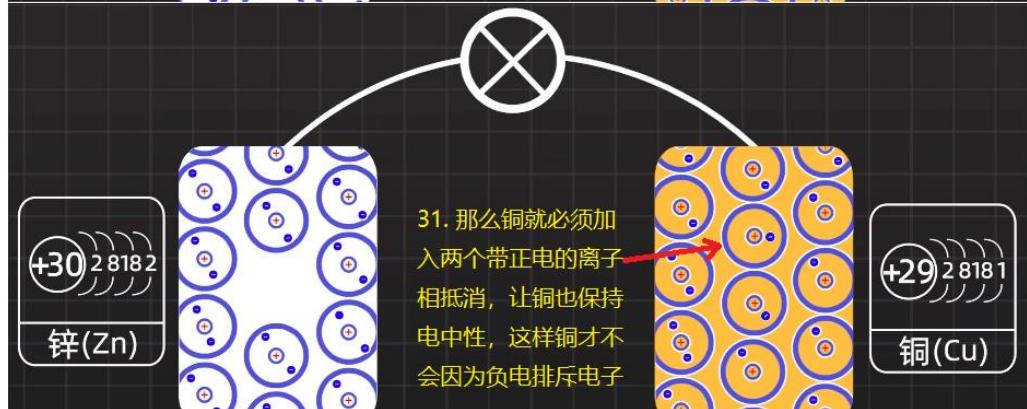
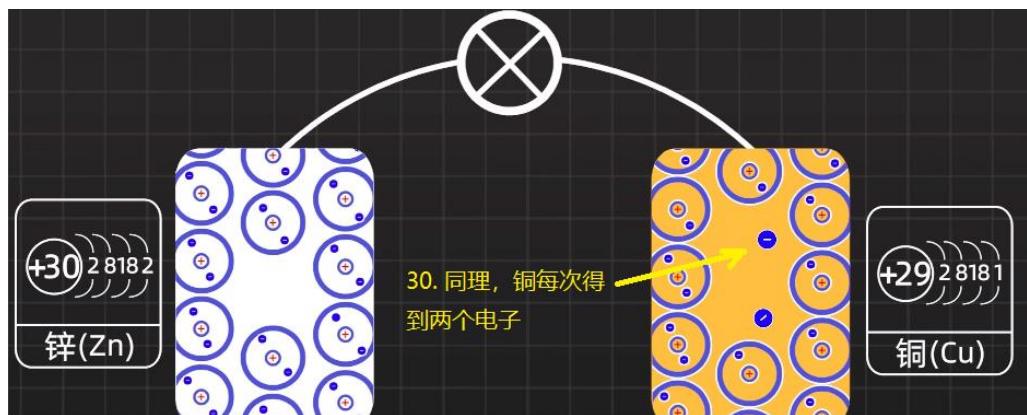


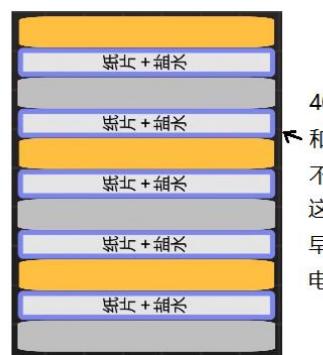
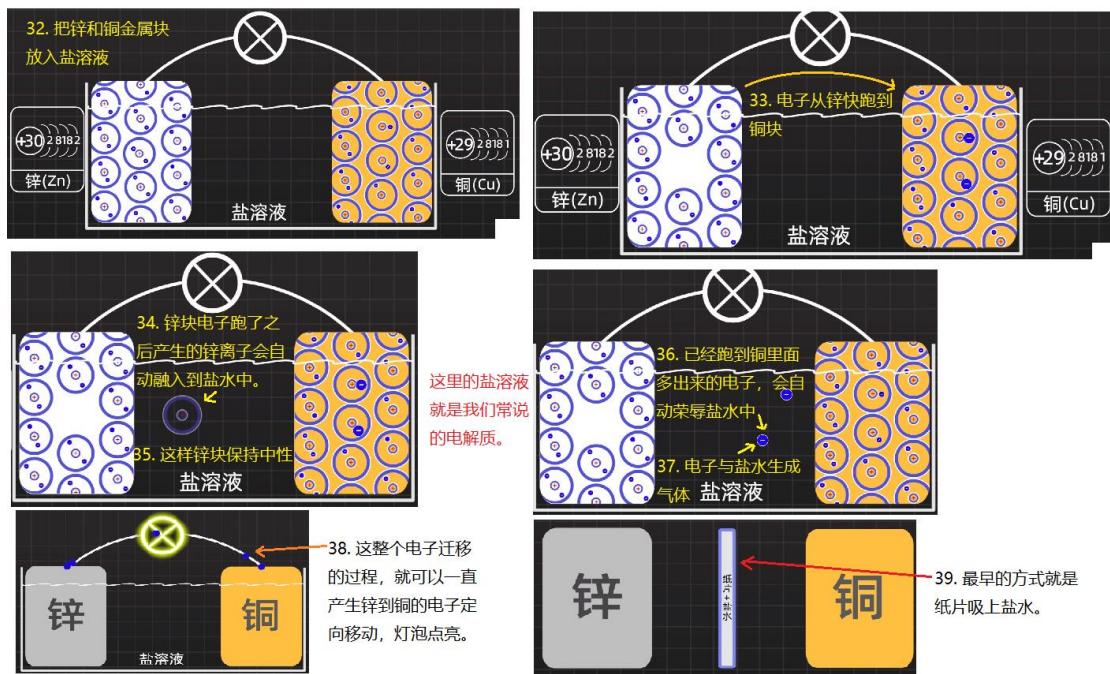
15. 铜的最外层电子容易脱离飞出成为自由电子。





27. 所以锌无法一直给铜灌入电子，就无法形成电流，灯泡不亮。锌和铜的模型无法使用。

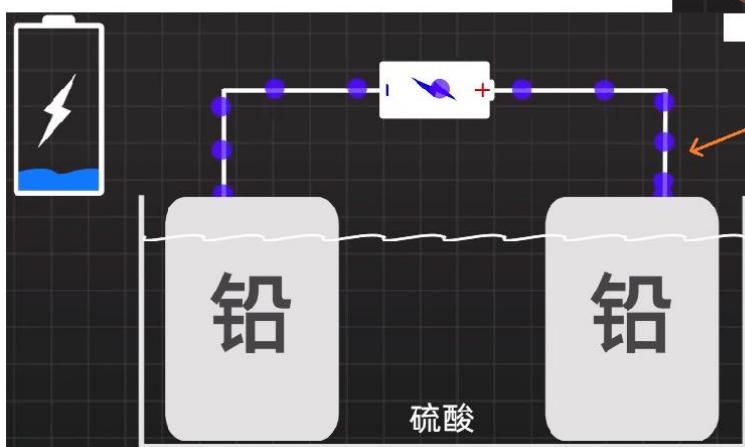


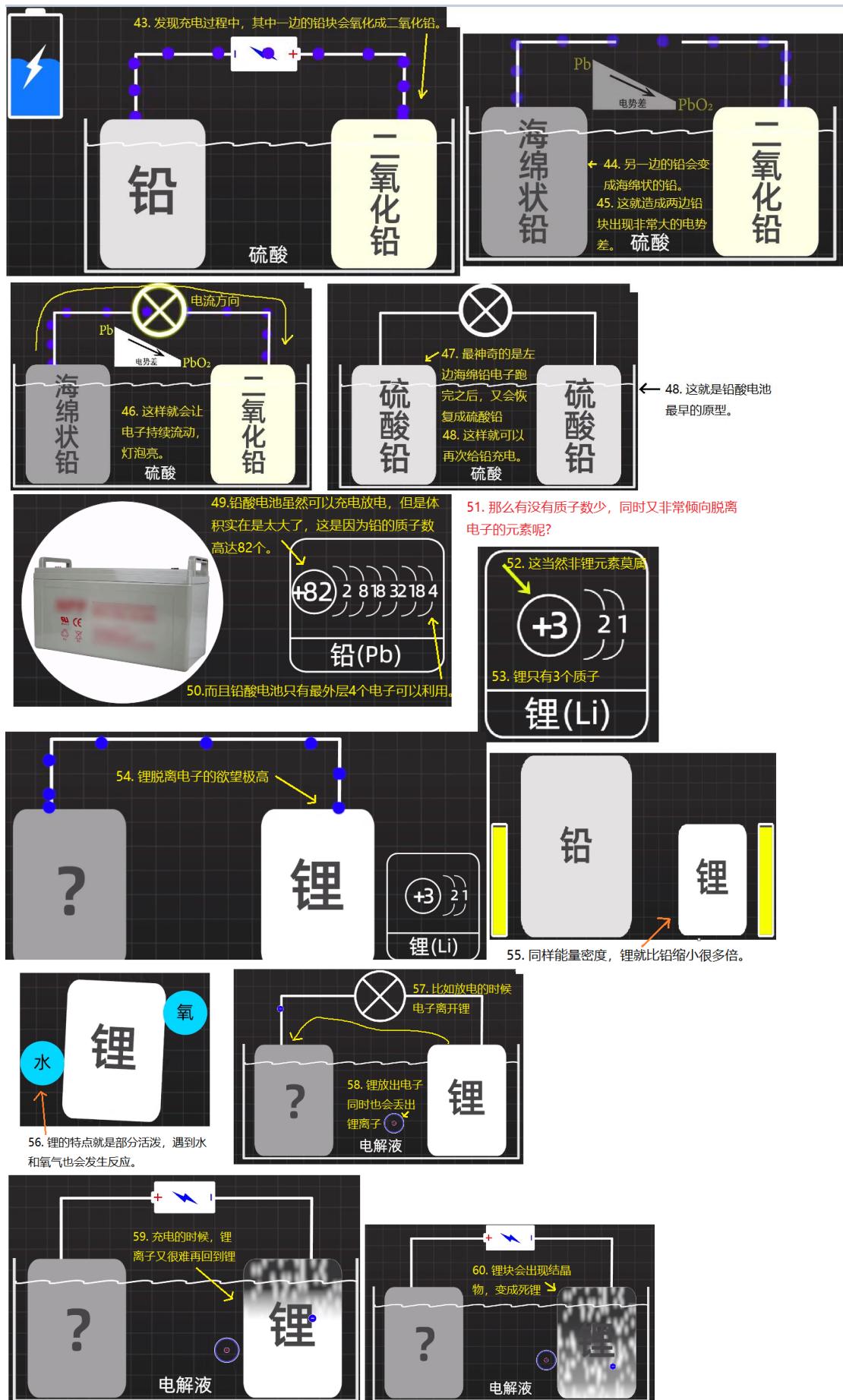


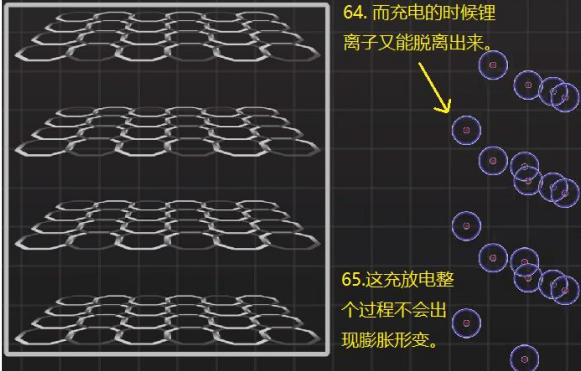
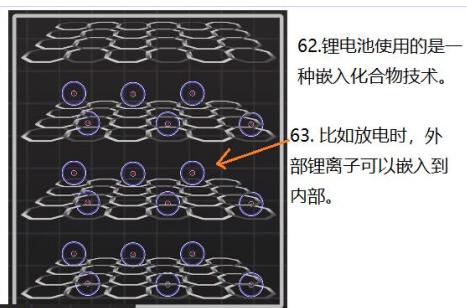
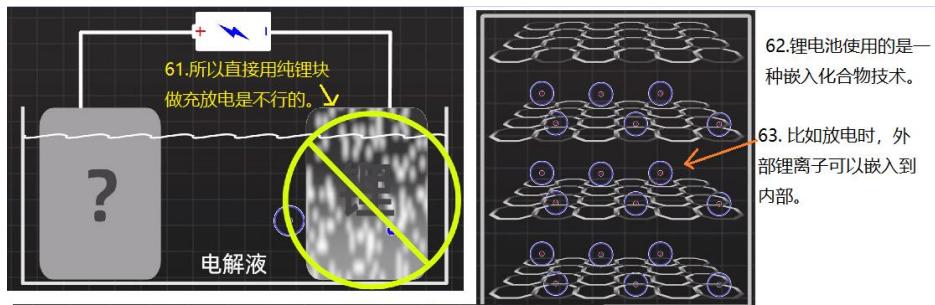
40. 将纸片放在铜和锌金属之间，不停堆叠。这就是世界上最早的电池，伏打电堆。



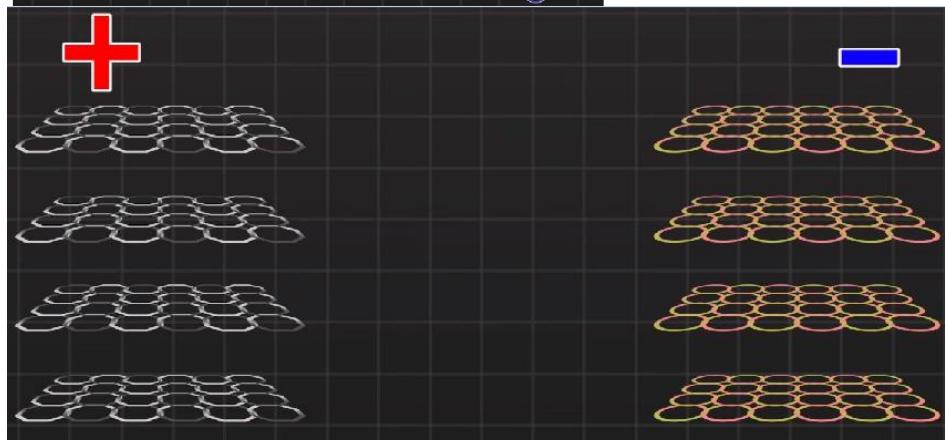
41. 伏打电堆  
但是这种伏打电堆的缺点就是只能一次性放电。并且不安全。



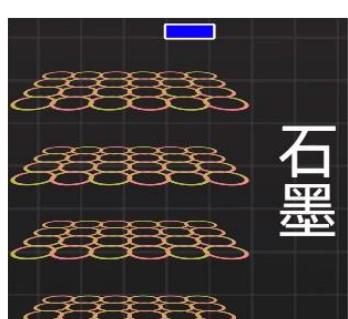
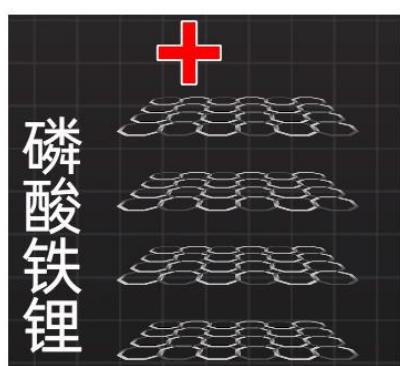




65. 这充放电整个过程不会出现膨胀形变。

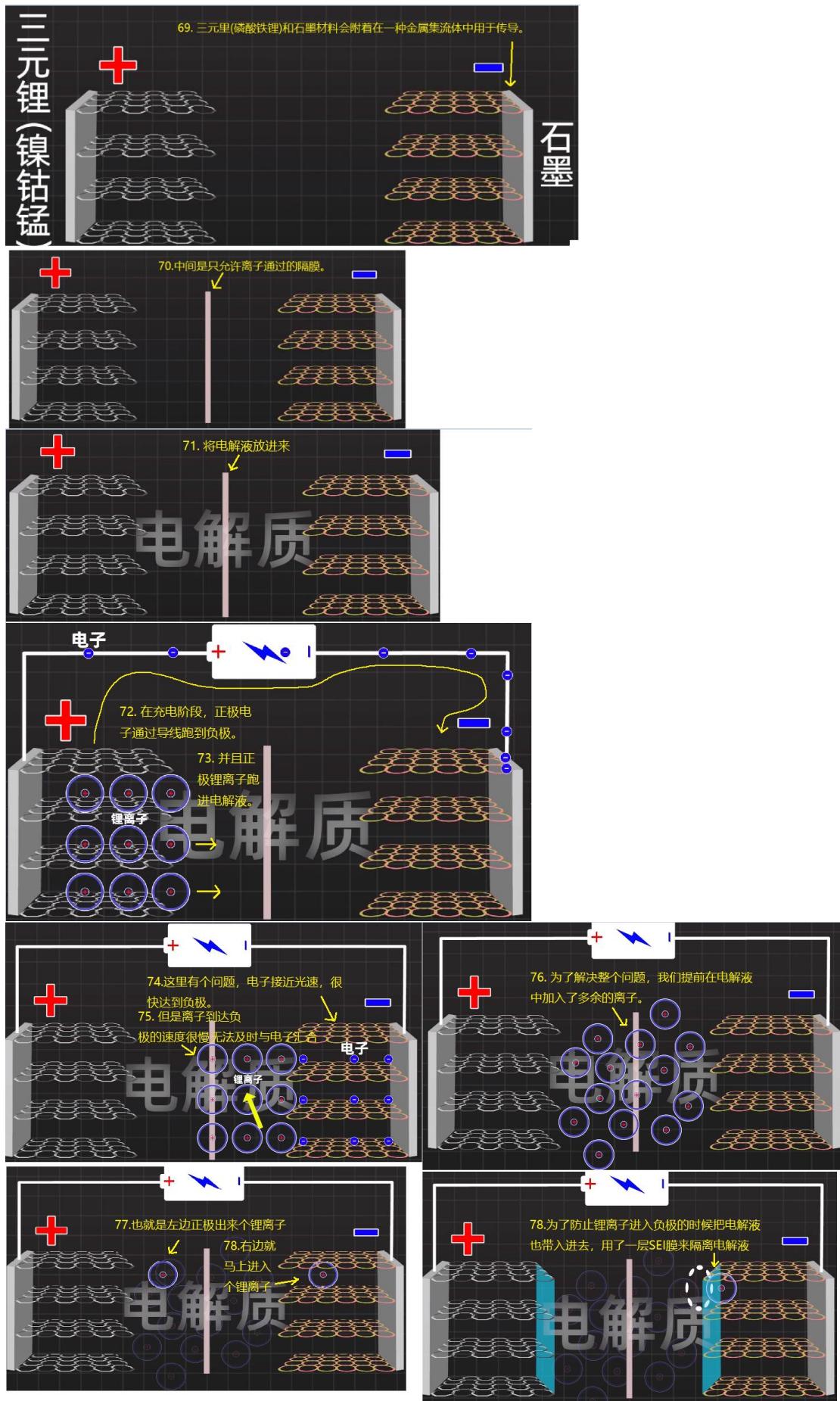


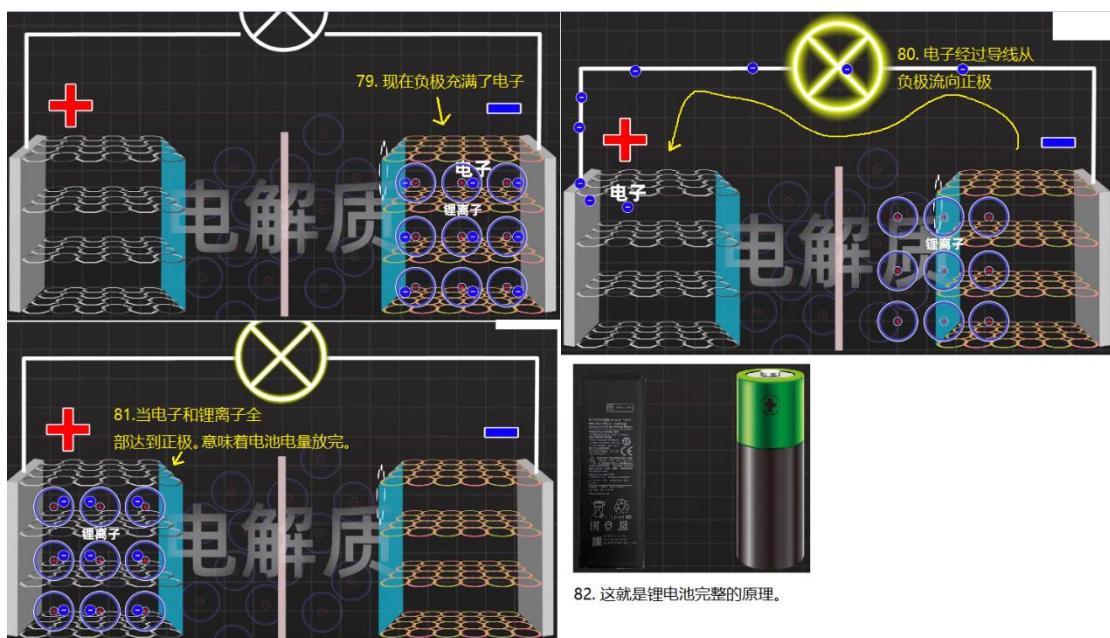
66. 基于锂电池这种特性，找到两种正负极材料。



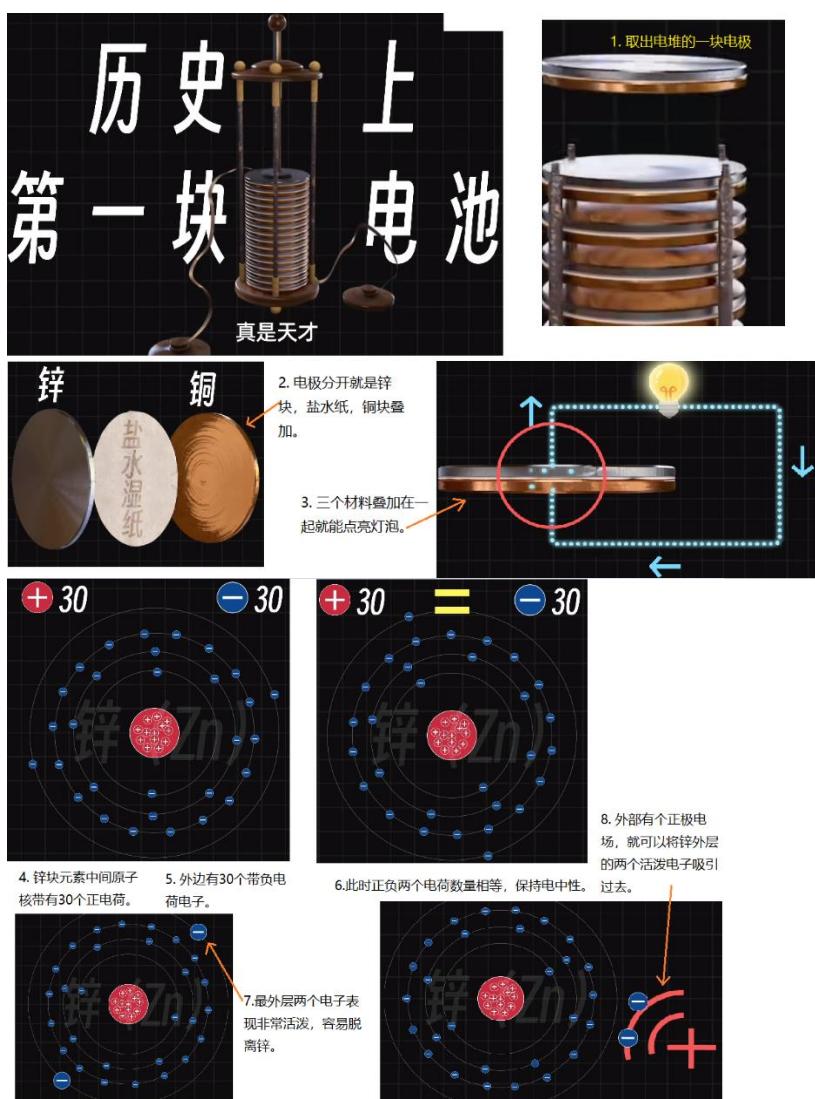
68. 负极采用石墨

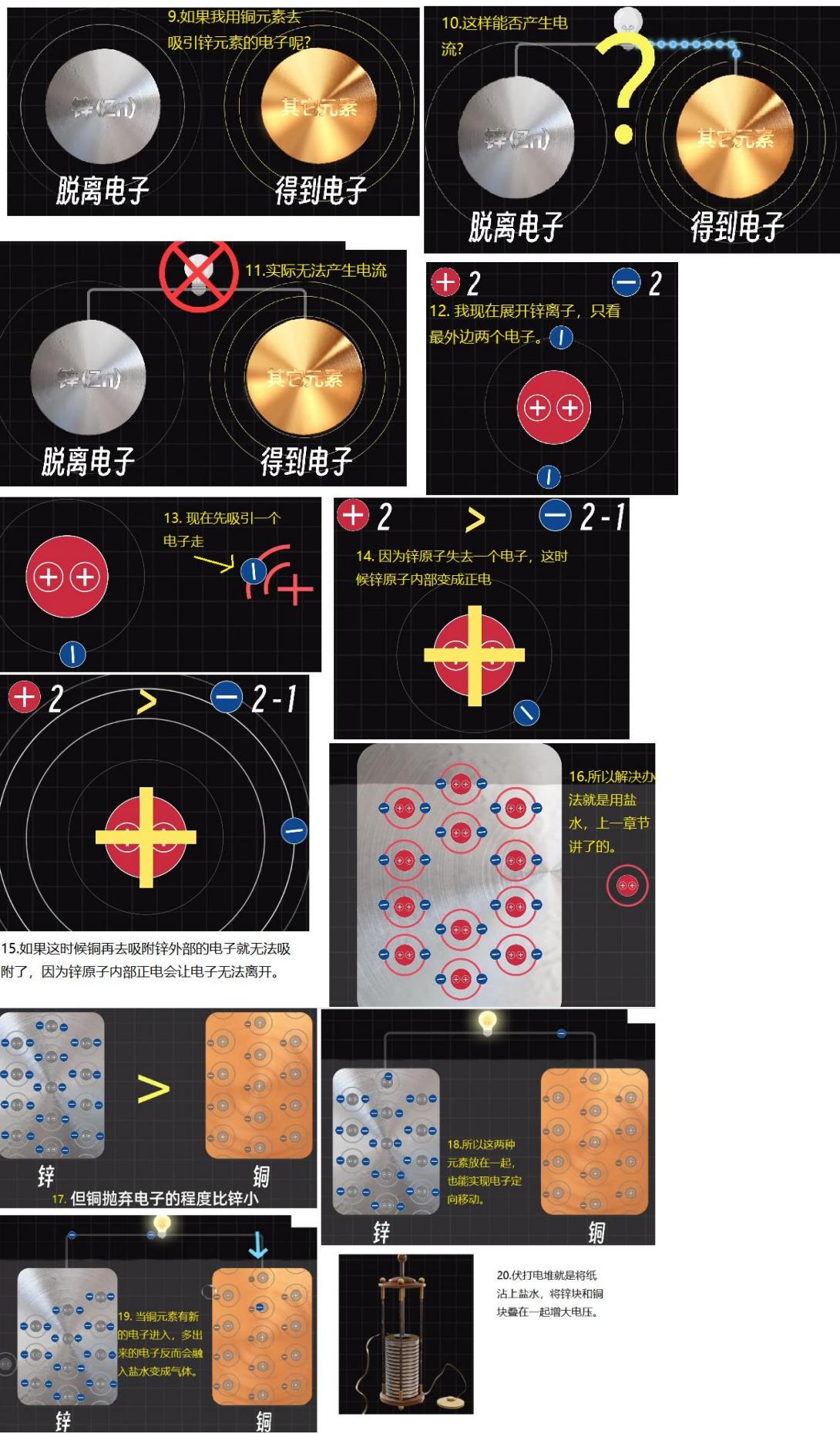
67. 其中正极采用磷酸铁锂材料，或者采用镍钴锰(三元里)材料。





## 伏打电堆结构





## 电池选型概念讲解

1. 锂电池的种类有这么多

18650电池

三元锂电池

磷酸铁锂电池

钴酸锂电池

聚合物锂电池

刀片电池

4680电池

固态锂电池

软包电池

液态锂电池

锰酸锂电池

2. 这些多种多样的电池，最终就是这三大类

# 锂电池

## 外形

- 18650电池
- 软包电池
- 4680电池
- 刀片电池

## 正极材料

- 钴酸锂电池
- 三元锂电池
- 磷酸铁锂电池
- 锰酸锂电池

## 电解液

- 聚合物锂电池
- 固态锂电池
- 液态锂电池

## 三元锂电池

3. 三元锂电池也可以

做出很多形状



18650 三元锂电池

软包 三元锂电池



4. 我手机电池居然是钴酸锂

## 钴酸锂 聚合物 软包电池

正极材料 电解液 外形

5. 我们主要从正极材料的维度来讲解电池。

## 正极材料

	能量密度	价格	循环寿命	安全性
钴酸锂电池	★★★★★	★★	★★	★
三元锂电池	★★★	★★	★★★	★★
磷酸铁锂电池	★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
锰酸锂电池	★★	★★★★★	★	★★★★★

## 钴酸锂电池

### 优点

能量密度高

### 缺点

价格贵  
安全性差



6. 能量密度高的意思就是在同样重量的情况下，钴酸锂电池可以做到更高的容量。

## 钴酸锂电池使用场景

7. 钴酸锂电池安全系数这么差为什么还能用在3C数码产品上。  
因为大家都希望自己数码产品电池容量更大。  
所以钴酸锂电池的安全问题，要求厂家工艺保证。但是钴酸锂电池本身是不安全的。



8. 三元锂电池可以调节镍钴锰占比，来微调三元锂电池能量密度。

	能量密度	价格	循环寿命	安全性
钴酸锂电池	★★★★★	★★	★★	★
三元锂电池	★★★	★★	★★★	★★
磷酸铁锂电池	★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
锰酸锂电池	★★	★★★★★	★	★★★★★

三元



# 正极材料



## 磷酸铁锂电池



### 优点

价格便宜

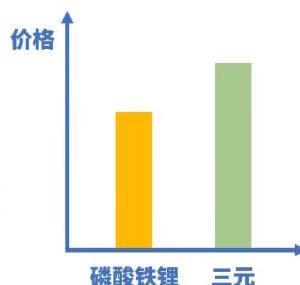
安全性高

循环寿命长

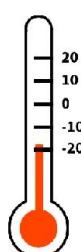
### 缺点

能量密度低

磷酸铁锂不耐低温



在低温下，磷酸铁锂容量小一半。



还有就是锰酸锂电池，价格便宜性能稳定安全，就是充电次数太少，适合充电宝领域使用。

## 电池能量密度理解

电功率：电流在单位时间内所做的功。

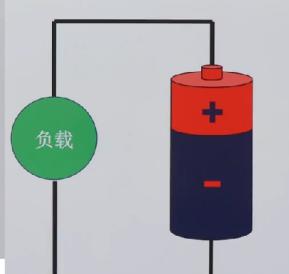
单位：W或KW。

是W/h或Kw/h，瓦时或者千瓦时



能量：50KW · h

在一定的时间放出去多少电能就是电池的功率。



电压 × 电流 = 功率  
我们平时认为电压电流就算功率。

$\frac{\text{能量}}{\text{时间}} = \text{功率}$

但是在电池领域，能量和时间也是功率的表现。

- 所以电池功率越大，负载就可以匹配越大。
- 电池输出功率大，负载功率要求小，烧负载。
- 电池输出功率小，负载要求功率大，电池带不动负载。
- 电池输出功率，和负载要求功率匹配，正常使用。

**功率密度（比功率）：**

单位体积或单位质量的电池所能输出的功率。

单位:W/L或W/Kg

如果评估电池，就是两块体积或者质量一样的电池，功率密度越大的电池，单位时间能释放的能量就越多。

**能量密度最低的是铅酸电池  
(Lead-acid):约30-50Wh/kg**

**镍镉电池(Ni-Cd):  
约40-60Wh/kg**

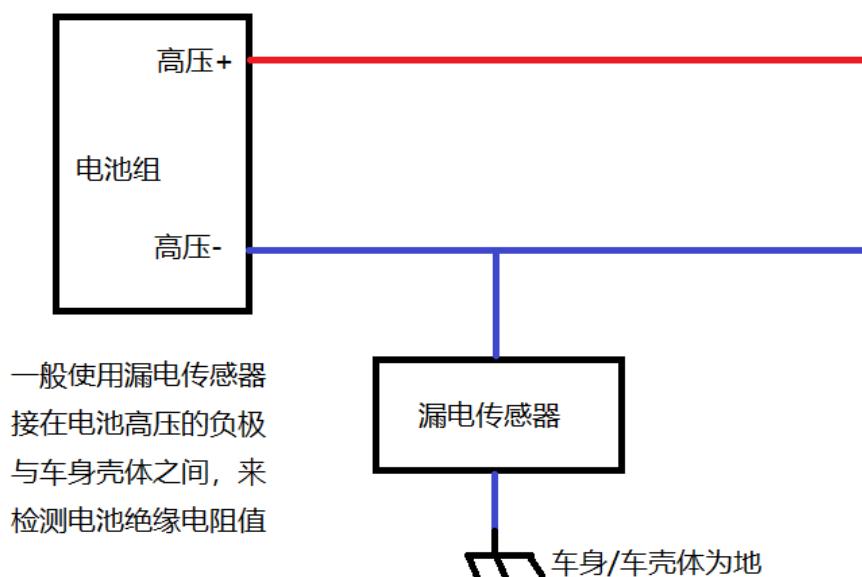
**镍氢电池(Ni-MH): 约60-120 Wh/kg      钠离子电池(Na-ion): 约100-150Wh/kg      锌空气电池(Zinc-air): 约100-150Wh/kg**

**钾离子电池(K-ion): 约100-200Wh/kg      锂离子电池(Li-ion): 约150-250 Wh/kg      钠硫电池(NaS): 约200-300Wh/kg**

**能量密度最高的是  
钠氧化物电池(Na-O2):  
能量密度约为400-600Wh/kg**

## 电池组漏电检测方法

漏电检测基本原理



根据绝缘阻值大小，判断漏电程度

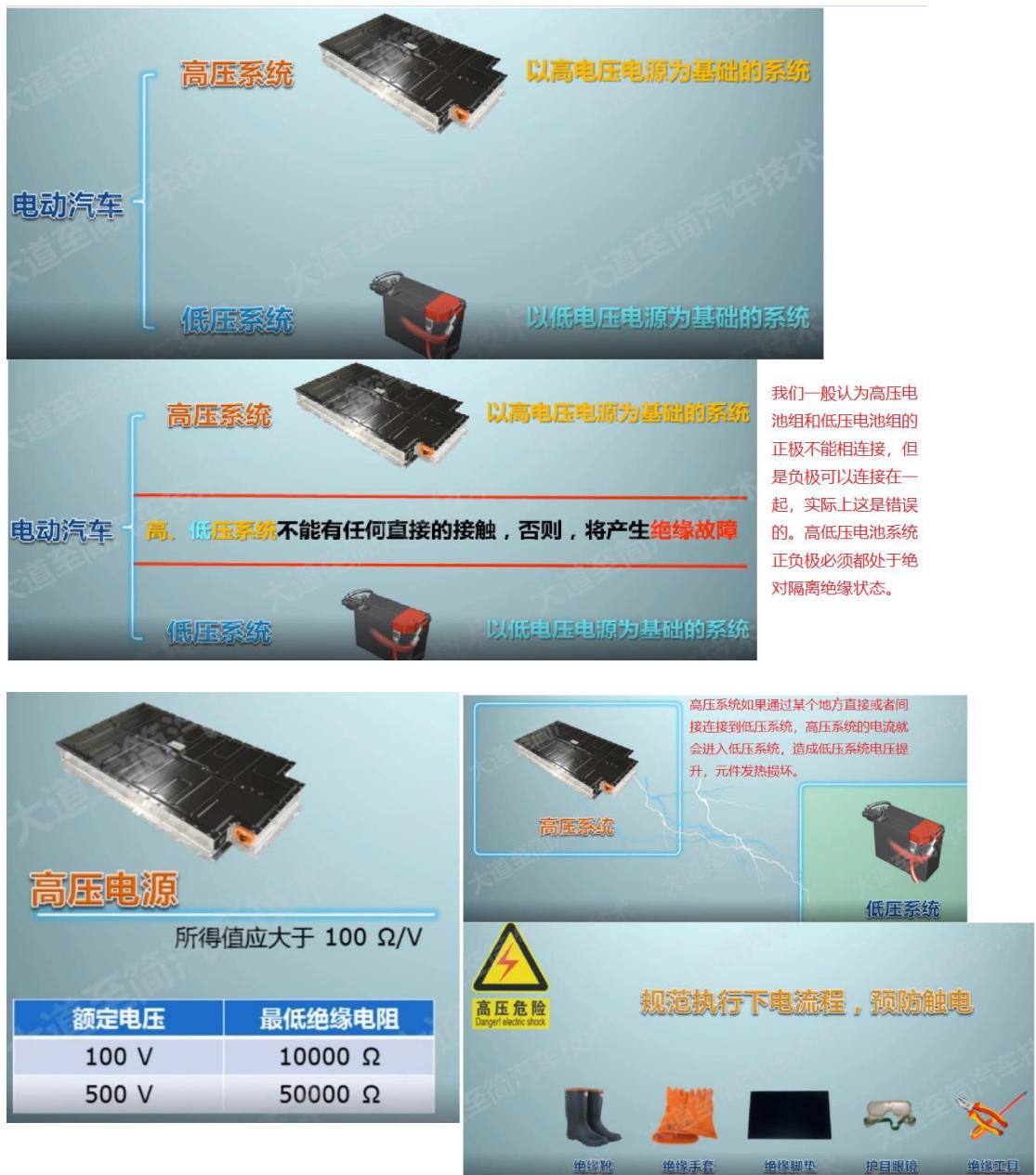
绝缘阻值  $R > 100\Omega/V$ ，或者  $R < 500\Omega/V$ ，认为一般漏电

比如电池组是300V输出电压， $100\Omega/V$ 就是 $30K\Omega$ ， $500\Omega/V$ 就是 $150K\Omega$

所以绝缘阻值在 $30K\Omega \sim 150K\Omega$ 之间就是一般漏电，不同的厂家不同车型规定不一样。

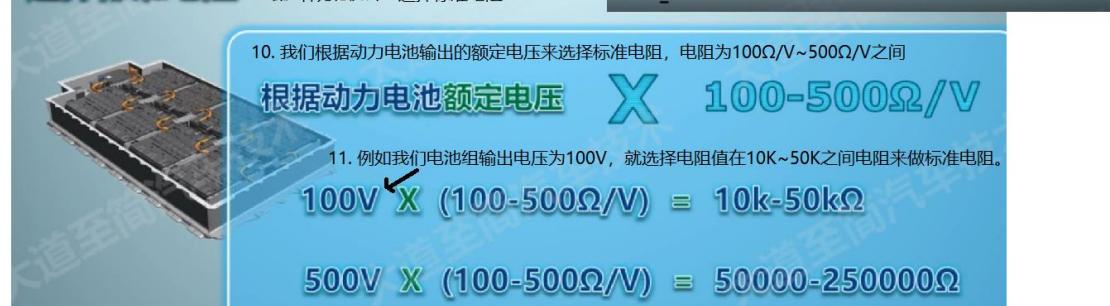
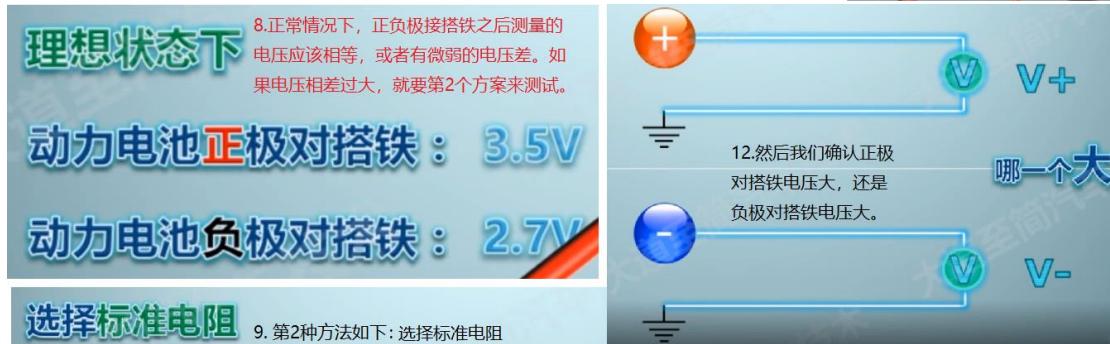
如果绝缘电阻 $< 100\Omega/V$ ，或者 $< 30k\Omega$ ，认为是严重漏电。

## 新能源汽车电池绝缘性能测试



## 使用万用表测量电池组绝缘性能





16. 然后使用标准万用表测量电阻两端的电压。

17. 然后带入公式就能计算出动力电池实际绝缘电阻值。

绝缘电阻值 =  $\frac{(V_{\text{大}} - V_{\text{测量}})}{V_{\text{测量}}} \times \text{标准电阻值}$

以上方法对于一般人员来说,可以判断大概动力电池的绝缘性能。如果是要做精密的绝缘电阻测试,以上方式是不完善的。

### 1. 实际测试方法演示

1. 实际测试方法演示

2.发现负极比正极少2V，证明电池组有漏电现象。

正常情况下应该正负都是5V

车身搭铁

计算绝缘电阻

额定电压：201.6V

标准电阻 = 额定电压  $\times$  100-500 $\Omega/V$

$201.6V \times (100-500\Omega/V) = 20160-100800\Omega$

20k-100k $\Omega$

绝缘电阻值 =  $\frac{(5V - 2.5)}{2.5} \times 100K\Omega$

这个绝缘电阻值完全达不到厂商的要求，所以可以断定该电池组存在严重漏电问题。

## 其他跟高压电源连接的部件也存在绝缘故障的可能性

比如连接电池的电缆，接插件也存在漏电的可能，所以用万用表并不是完整能反映电池组漏电的现象，除非电缆和接插件，结构件这些确实不存在绝缘层脱落现象，才可以判定电池属于漏电。

### 使用兆欧表测量电池组绝缘性能

上一节用万用表测量绝缘电阻是因为电池组存在电压输出，经过与搭铁的压差测量得到的绝缘电阻，但是在很多设备应用中，设备本身没有电池，设备也没有通电，那么这种情况下怎么测量绝缘电阻呢？我们可以用万用表电阻挡来测试设备外壳的绝缘电阻，但是外壳绝缘电阻受环境温度湿度的影响，会变得不稳定，比如干燥环境绝缘电阻很高，潮湿环境下绝缘电阻很低。所以我们必须给结构外壳加入一个电压，用这种加电的方式来测量绝缘电阻。

使用兆欧表  
测算动力电池绝缘性能

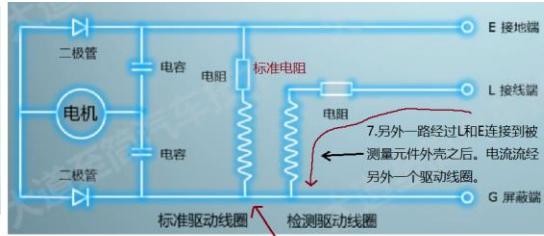
手摇发电

1. 我们使用兆欧表，兆欧表把手摇动的时候，兆欧表内部发电机发出一个高压直流电，经过表笔输出电压加载到被测量的外壳上。

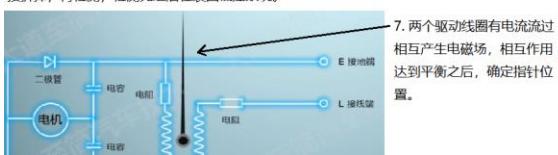
塑料	玻璃钢	合金	铝壳	型号	额定电压	测量范围	准确度	允差	绝缘电阻
	ZC11D	-3	500V	0~2000M $\Omega$	20级	±10%	30M $\Omega$		
		-4	1000V	0~5000M $\Omega$					
		-5	2500V	0~10000M $\Omega$					
		-10	2500V	0~2500M $\Omega$					
	ZC11D (铝壳)	-5L	2500V	0~10000M $\Omega$					
		-10L	2500V	0~2500M $\Omega$					

2. 兆欧表有很多个电压输出规格，所以在测量的时候我们必须知道被测外壳最大额定电压能承受多少V，来确定哪一款电压的兆欧表。

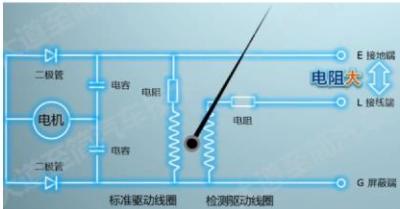
如果兆欧表输出电压与外壳需求电压不匹配，会出现测量不准确，或者损坏被测外壳。



5. 因为兆欧表使用过程中会输出500V以上的电压加载到被测外壳上。因为电动车通常采用低压系统控制高压系统。所以我们用兆欧表测量汽车高压模块绝缘时，要注意保护低压系统。或者把低压系统直接拆掉，再检测，检测完之后在装回低压系统。



6. 兆欧表内部小型发电机，发出的电压有两路，一路电压经过标准电阻加载到标准驱动线圈上。



9. 当被元件与搭铁绝缘电阻降低时，指针会指向电阻低的一边，但是要注意，如果指针不停指向0欧姆，必须马上停止兆欧表使用，不然因为外壳短路造成兆欧表烧毁。



### 三、使用兆欧表测量绝缘值



## 电池性能检测

1. 电池mAh与Wh的区别

### 电池与充电

2. 手机电池都是用mAh来表示

有线快充：100W 超级闪充  
↓  
电池：不可拆卸，双电芯 5000mAh  
SUPERVOOC S 全链路电源管理芯片

4. 电脑虽然也会写mAh容量，但是也会标注Wh



电源规格

电池

3. 而电脑都是用瓦时来表示

80Wh



5. 电脑上5000mAh电池比手机5000mAh电池大多了。

7. 但是，如果是跨设备，手机和电脑对比呢？  
这就不能用mAh对比了。应该用Wh对比

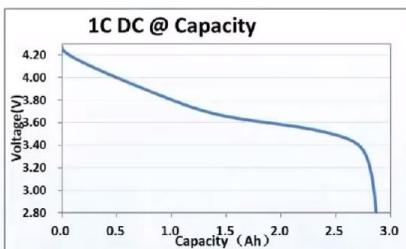
$$Wh = mAh / 1000 \times V$$

额定容量/Rated Capacity/정격용량: 5195mAh/60Wh

额定电压/Rated Voltage/정격전압: 11.55V

$$(5195mAh / 1000) \times 11.55V = 60.00225Wh$$

### 3.2 电池容量测试



电池容量 (Capacity, 缩写为C) : 表示在**规定条件下**电池放出的电量，通常以安培·小时为单位(简称Ah表示，即以电流 I 放电 T 小时， $C(Ah)=I(A)*T(h)$ )。

电池能量 (Energy, E) : 表示在**规定条件下**电池放出的电量，通常以瓦·小时为单位 (简称Wh表示，  $E(Wh)=I(A)*V(V) *T(h)$  )。

能量密度 (Energy density) : 指的是单位体积或单位质量的电池所放出的能量，即体积能量密度或质量能量密度。

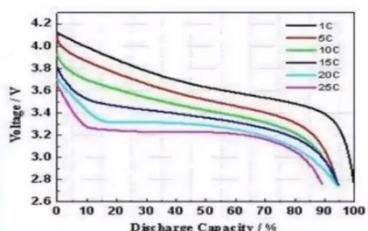
标准充电方式：室温下以1C电流放电至终止电压，搁置1h后，以1C电流恒流充电至截止电压转入恒压充电，充电电流低于0.05C时停止充电，充电后搁置1h。

#### 室温放电容量及能量：

以标准方式充电，以1C电流放电至终止电压，计算放电容量 (以Ah) 及放电比能量 (Wh/kg)，重复5次，取后三次结果均值。

判定标准：容量应为额定容量的100-110%之间，单体之间差异不超过5%

### 3.3 电池倍率放电测试



倍率 (C-Rate) : 放电倍率是指电池**放电电流**的数值为**额定容量**数值的倍数。如放电电流为 0.1C，对于一个 50Ah 的电池，即以  $50 * 0.1 = 5A$  的电流放电，3C 即以  $50 * 3 = 150A$  的电流进行放电。

极化：蓄电池在电流通过时，电极电位偏离平衡电极电位的现象成为电池极化，包括**欧姆极化**、**电化学极化**和**浓差极化**，通过的电流越大、极化越大。

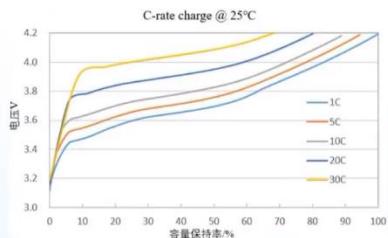
标准充电方式：室温下以1C电流放电至终止电压，搁置1h后，以1C电流恒流充电至截止电压转入恒压充电，充电电流低于0.05C时停止充电，充电后搁置1h。

#### 室温倍率放电性能：

以规定方式充电，室温以3C电流放电，直至任一单体电压达到放电终止电压止，计算放电容量。

判定标准：容量不低于额定值的90%

### 3.4 电池倍率充电测试



**倍率 (C-Rate)**: 充放电倍率是指电池放电电流的数值为额定容量数值的倍数。如放电电流为 0.1C，对于一个 10Ah 的电池，即以  $10 \times 0.1 = 1A$  的电流放电，3C 即以  $10 \times 3 = 30A$  的电流进行放电。

**极化**: 蓄电池在电流通过时，电极电位偏离平衡电极电位的现象成为电池极化，包括欧姆极化、电化学极化和浓差极化，通过的电流越大、极化越大。

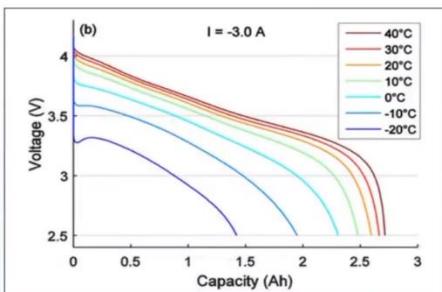
标准放电方式：室温下以1C电流放电至终止电压，搁置1h。

#### 室温倍率放电性能：

以规定方式充电，直至任一单体电压达到充电终止电压止，计算充电容量。

**判定标准**：容量不低于额定值的80%

### 3.5 电池高低温测试



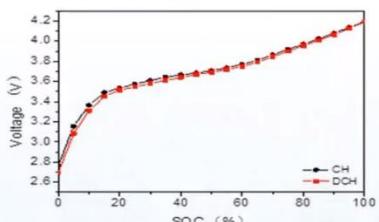
**温度对极化的影响**：温度降低时，电化学反应速率降低、锂离子在正负极材料以及电解液中的传输速率降低，导致极化增加，在放充放电过程中的表现就是容量的降低。

#### 高低温放电容量：

以标准方式充电，在规定温度下搁置5-24h，并在规定温度下放电至任一单体蓄电池达到室温放电终止电压，计算放电容量。

**判定标准**：-20°C计算容量不低于额定值的70%，55°C计算容量不低于额定值的90%

### 3.6 电池SOC-OCV测试



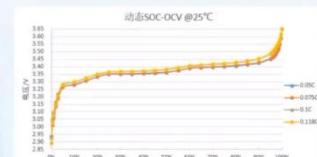
**SOC**: 电池SOC即荷电状态，是用来反映电池的剩余容量的，其数值上定义为剩余容量占电池容量的比值，常用百分数表示。

**OCV**: OCV是Open circuit voltage=开路电压，指的是电池不放电开路时，两极之间的电位差。

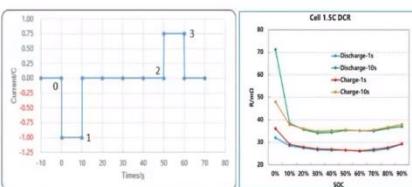
**静态SOC-OCV**: 室温定容——指定电流恒流恒压将电池充满——搁置2h——以定容所采用的电流恒流放电至指定SOC——搁置2h，重复“放电-搁置”工步直至放电至0%SOC (充电SOC-OCV: 从0%SOC充电调荷直至充到100%SOC)

- ① 目标温度下以目标温度的容量，在目标温度调荷；
- ② 以室温容量为基准，在室温调荷至目标SOC，在目标温度搁置读取OCV；
- ③ 以室温容量为基准，在目标温度调荷至目标SOC，在目标温度搁置读取OCV；

**动态SOC-OCV**: 电池在指定温度下热平衡——以0.05C电流恒流放电至终止电压——搁置30min，以0.05C电流恒流充电至终止电压



### 3.7 电池直流内阻测试



**直流内阻:** 工作条件下电池的电压变化与相应的放电电流变化之比。直流内阻通常用欧姆 ( $\Omega$ ) 来表示，经常缩写为DCR。

**交流内阻:** 利用电池等效于一个有源电阻的特点，给电池一个1KHz, 50mA的恒定电流，对其电压采样整流滤波等一系列处理从而精确地测量其阻值。一般交流内阻代表电池的**欧姆内阻**，比直流内阻小。

**极化:** 蓄电池在电流通过时，电极电位偏离平衡电极电位的现象成为电池极化，包括**欧姆极化、电化学极化和浓差极化**，通过的电流越大、极化越大。

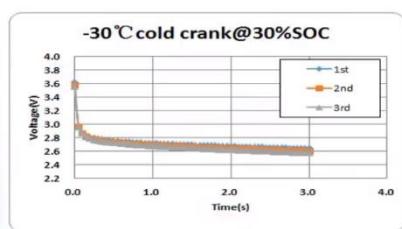
$$\text{放电内阻: } R_d = \frac{V_0 - V_1}{I_1} \quad \text{放电功率: } P_{d-\max} = \frac{V_{\min}(\text{OCV}_{\text{dis}} - V_{\min})}{R_d} \quad P_d = V_1 * I_1$$

$$\text{充电内阻: } R_c = \frac{V_2 - V_3}{I_2} \quad \text{充电功率: } P_{c-\max} = \frac{V_{\max}(V_{\max} - \text{OCV}_{\text{cha}})}{R_c} \quad P_c = V_3 * I_3$$

**标准测试方式:** 在一定温度和SOC下，给一个持续时间（通常为1~30S）和持续大小的直流脉冲，通过脉冲前和末端的电压来计算得出。

**主要控制参数:** 温度、脉冲电流、脉冲时间、搁置时间、采样频率

### 3.8 电池冷启动性能测试



**冷启动:** 冷启动的过程用最简单的话说，就是转动钥匙，蓄电池带动起动机转动，再拖动发动机转动、吸气、喷油、点火、起动，待转速上升至目标转速后，保持转速稳定。

**冷启动性能:** 测试电池在低温下的脉冲放电能力，是功率型电池的测试项目

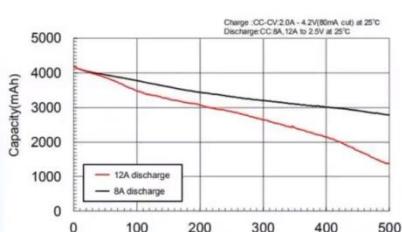
**冷启动测试:** 在室温下标定电池容量——将电池充满电——以规定电流调整到固定SOC——在指定温度下 (-30°C) 到达热平衡——以规定功率放电3s或2s——静置20s——重复恒功率放电3次

**判定标准:** 电池满足指定功率下放电时长，放电最低电压大于规定的下限电压

**影响因素:** 测试温度、测试功率、测试时间、截止电压

电池冷启动就是在低温条件下能否瞬间提供大电流。

### 3.10 电池循环寿命测试



**标准循环寿命:** 电池标准循环寿命是指在一定的充放电制度下，电池容量衰减到某一规定值之前，电池能经受的充电与放电循环次数。一个循环指一次充满加一次满放。

**工况循环寿命:** 工况循环寿命则多用于电动汽车用的动力电池，其主要考核的是电池按照工况图谱来测试动力电池的使用寿命。

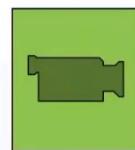
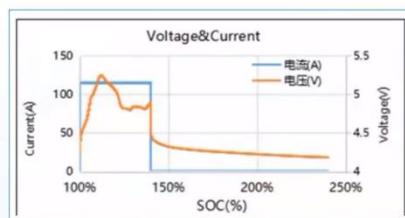
#### 标准循环寿命测试:

以1C电流放电至终止电压，搁置30min，按标准方式充电，搁置30min或企业规定的搁置时间，以1C电流放电至终止条件，记录放电容量及能量，重复进行充放电到电池容量衰减到规定值，记录充放电圈数

**工况循环寿命测试:** 在特定SOC状态下，按照指定的充放电电流工况进行充放电，一个完整充放电工况做完记录一圈，重复工况至电池容量衰减到规定值，记录充放电圈数

**其他循环测试:** 区间循环、高温循环、低温循环

#### 4.1 电池过充测试

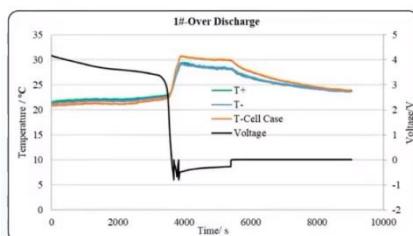


##### 过充测试：

- 以标准充电方式充电——以1C电流恒流充电至电压达到规定充电终止电流的1.5倍或者充电时间达1h后停止充电——观察1h
- 以标准充电方式充电——以1/3C电流恒流充电至电压达到规定充电终止电流的1.1倍或者充电达115%SOC后停止充电——观察1h

**要求：不起火、不爆炸**

#### 4.2 电池过放测试

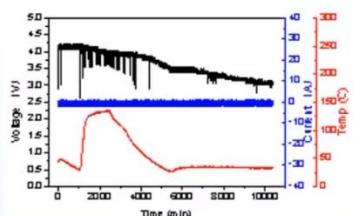


##### 过放测试：

- 以标准充电方式放电——以1C电流放电90min——观察1h

**要求：不起火、不爆炸、不漏液**

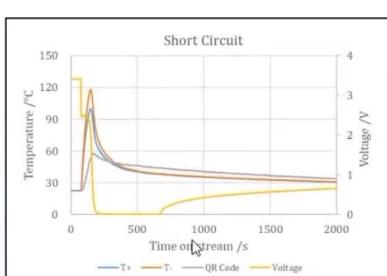
#### 4.3 电池加热测试



##### 加热测试：

- 将电池按照标准方式进行充电——电芯放入温度箱中，按 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温 $130^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，保持30 min，停止加热观察1h
- 要求：不起火、不爆炸

#### 4.4 电池短路测试



##### 短路测试：

- 将电池按照标准方式进行充电——将电池正极和负极外短路10min，外部短路电阻小于 $5\text{m}\Omega$ ，观察1h
- 要求：不起火、不爆炸

#### 4.5 电池针刺测试



##### 针刺测试：

- 将电池按照标准方式进行充电，用 $\varphi 5 \text{ mm} \sim \varphi 8 \text{ mm}$ 的耐高温钢针、以 $25 \pm 5 \text{ mm/s}$ 的速度，从垂直于电芯极板的方向贯穿，观察1h
- 要求：不起火、不爆炸

#### 4.6 电池挤压测试

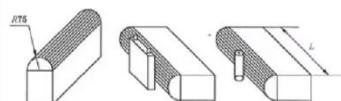
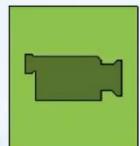


图 1 单体挤压板和挤压示意图



##### 过充测试：

- 将电池按照标准方式进行充电
- **挤压方向：**垂直于电芯极板；
- **挤压板形式：**半径75mm的半圆柱体，半圆柱体的长度大于被挤压电芯的尺寸；
- **挤压速度：**不大于2mm/s；
- **挤压程度：**电芯电压变为0 V或变形量达到15 %或挤压压力达到100 kN或者1000倍试验对象重量后停止挤压，保持10min；
- 要求：不起火、不爆炸



## 电池直流内阻测试电路设计

电池直流内阻测试有什么好处？测试电池直流内阻就可以直接判断电池当前最大容量是多少，不用像以前那样靠给电池放电来判断容量，电池放电判断容量很浪费时间。

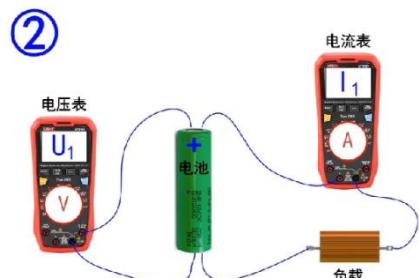
### ● 大家(可能)熟知的电池直流内阻测试过程



① 首先用电压表测量电池的空载开路电压，记为 $U_0$

② 给电池连接上一个负载，并串联电流表测电流。

当电压表、电流表读数基本稳定后，记下电池带载电压 $U_1$ ，以及负载电流 $I_1$



➤ 则计算得到电池的“直流内阻”为  $r = \frac{U_0 - U_1}{I_1}$

□ 类似地，也可以通过给电池充电来测“直流内阻”

对于电池的交流内阻测试方式如下：



- 很简单，直接用内阻测试仪测试
- 但是内阻测试仪较贵，且功能过于单一，只能测电压与内阻

那么这种方法测到的直流内阻和交流内阻有什么关系呢？

- 被测电池（实验对象）：四个电池，三类：磷酸铁锂电池、三元锂或钴酸锂电池、钛酸锂电池

电池1



电池2



电池3



电池4



- 引线式磷酸铁锂电池
- 软包磷酸铁锂电池
- 引线式三元锂或钴酸锂电池
- 引线式钛酸锂电池

1300mAh

20Ah

4000mAh

1300mAh

1. 我们用这4种电池来测试直流内阻和交流内阻关系。

1、首先确认电池已经被静置了足够长的时间。（距上一次充放电已过很长时间）

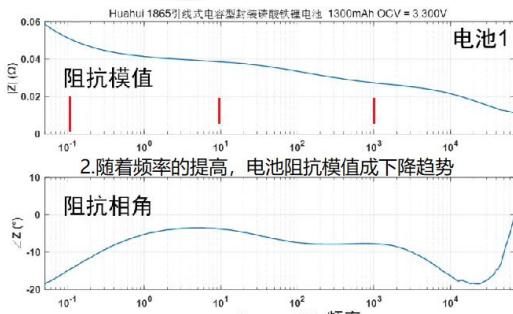


2、用专业频率响应分析仪，测试电池在不同频率下的交流阻抗

频率范围：0.05Hz~70kHz for 电池1

0.05Hz~10kHz for 电池2、电池3、电池4

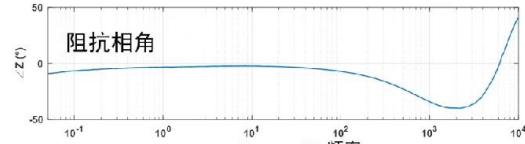
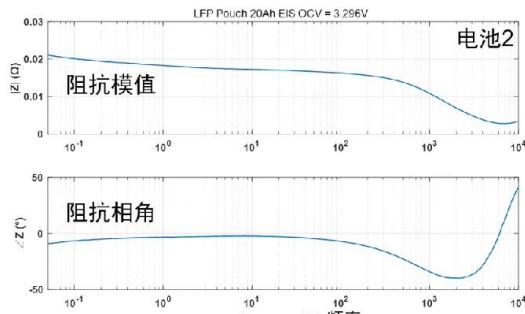
1kHz频率，在测试频率范围段内



2. 随着频率的提高，电池阻抗模值成下降趋势



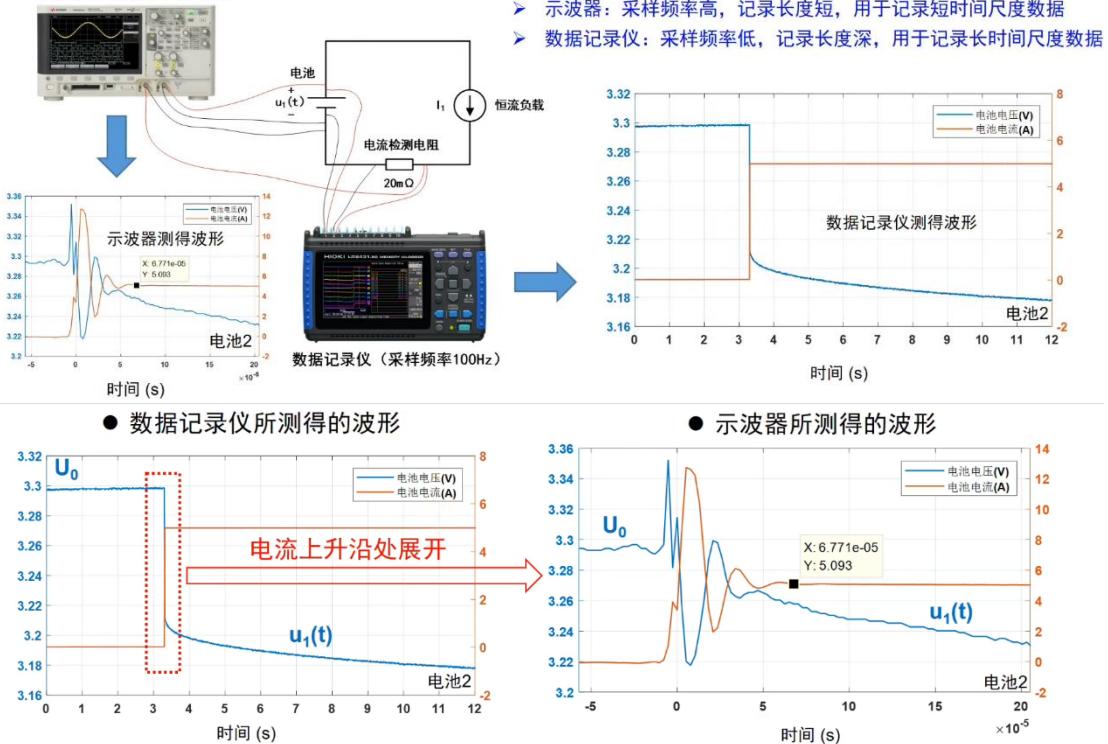
3. 在0.1hz, 10hz, 1000hz频率处，交流阻抗模值还是相差很大的。



3、测量电池直流内阻。首先测量恒流放电开始前后的一小段时间内的电池端电压变化数据：

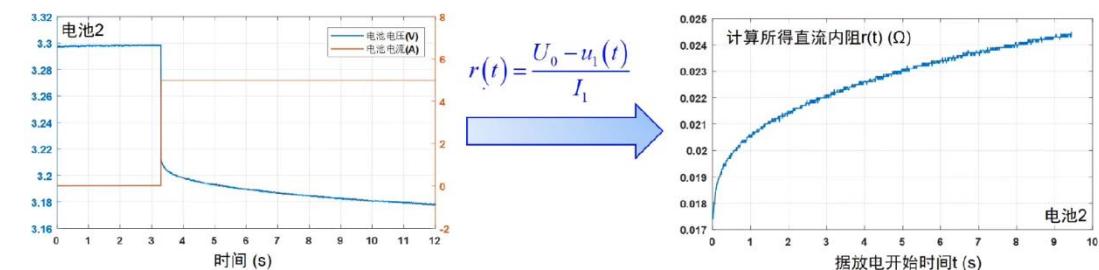
利用恒流放电负载，对电池进行恒电流放电，同时测量并记录电池端电压与放电电流随时间变化关系

示波器（高分辨率采样模式）

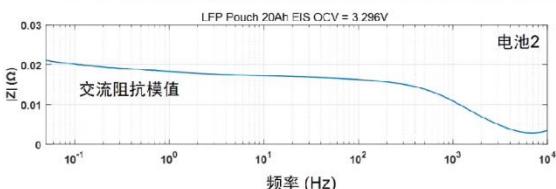


- 放电开始前，放电电流为零，电池电压保持恒定不变，记为 $U_0$
- 恒流放电负载启动后，放电电流由0A上升至设定值需要一定的时间，中间过程可能存在振荡，但可在100μs达到设定恒流值
- 放电开始的一瞬间，电池电压会突然下降
- 放电电流在很短时间内(<100μs)达到稳定的恒定值后，电池电压随着恒流放电过程的进行会缓慢地逐渐下降

### ● 直流内阻 $r(t)$ 的计算



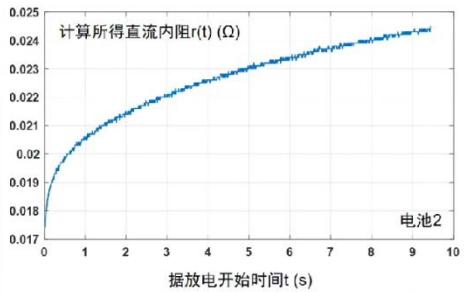
□ 在放电开始后的不同时间点测量电压，计算出的内阻各不相同。离放电开始的时间越长，则计算得到的内阻越高



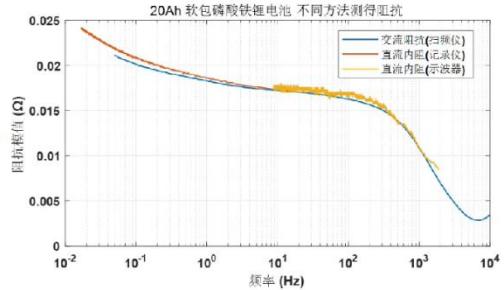
□ 直流“内阻”随距离放电开始的时间而变化，而交流阻抗随测试频率的变化而变化

➤ 如何将“时间”与“频率”之间建立起联系？

### ● 将时间代换成频率

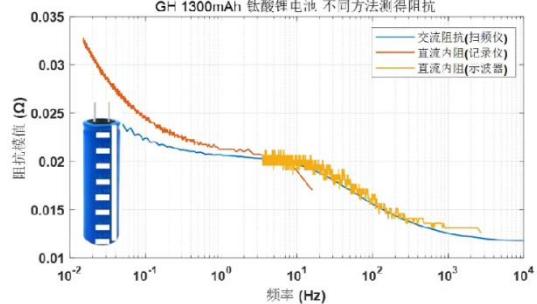
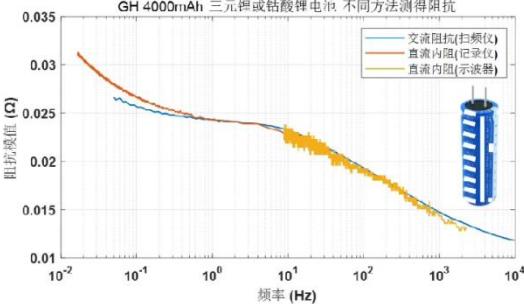
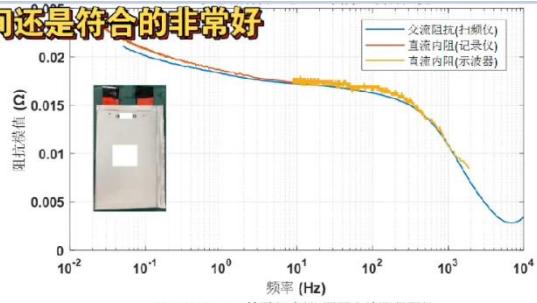
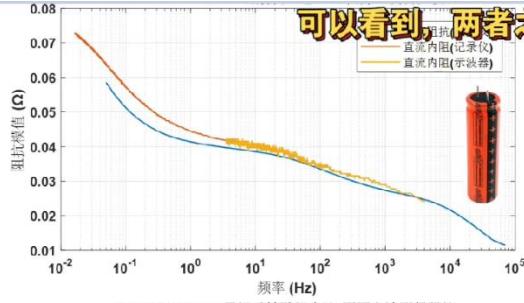


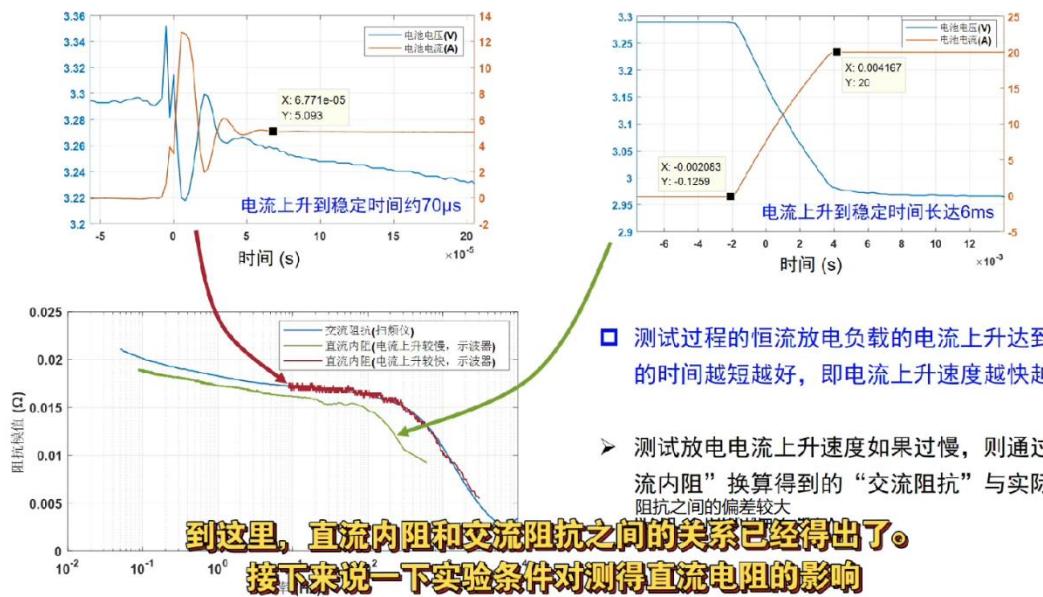
$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{t}$$



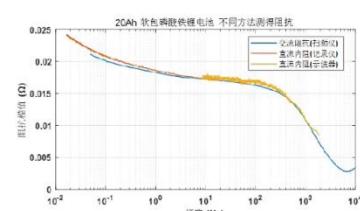
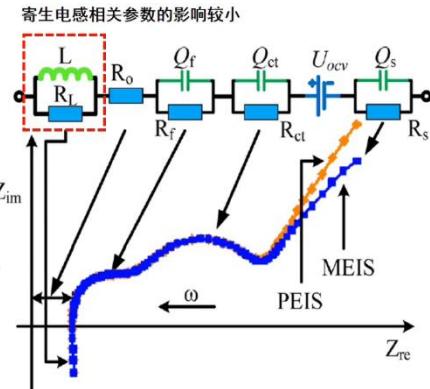
- 通过直流内阻 $r(t)$ 随时间变化的关系曲线中的时间 $t$ 代换为频率 $f$ 后，代换得到的曲线与交流阻抗曲线差距较小，变化趋势几乎完全相同
- 即是：用开始恒流放电后间隔时间 $t$ 测得的电池端电压，除以放电电流得到的直流内阻，近似等于频率为 $f=1/(2\pi t)$ 处的交流阻抗的模值
- 例如，在开始放电后159.15μs的时刻测得的电池电压换算的内阻，近似等于1kHz处的交流阻抗

➤ 这仅仅只是一个巧合吗？对于其它类型的电池，是否也符合这种关系？

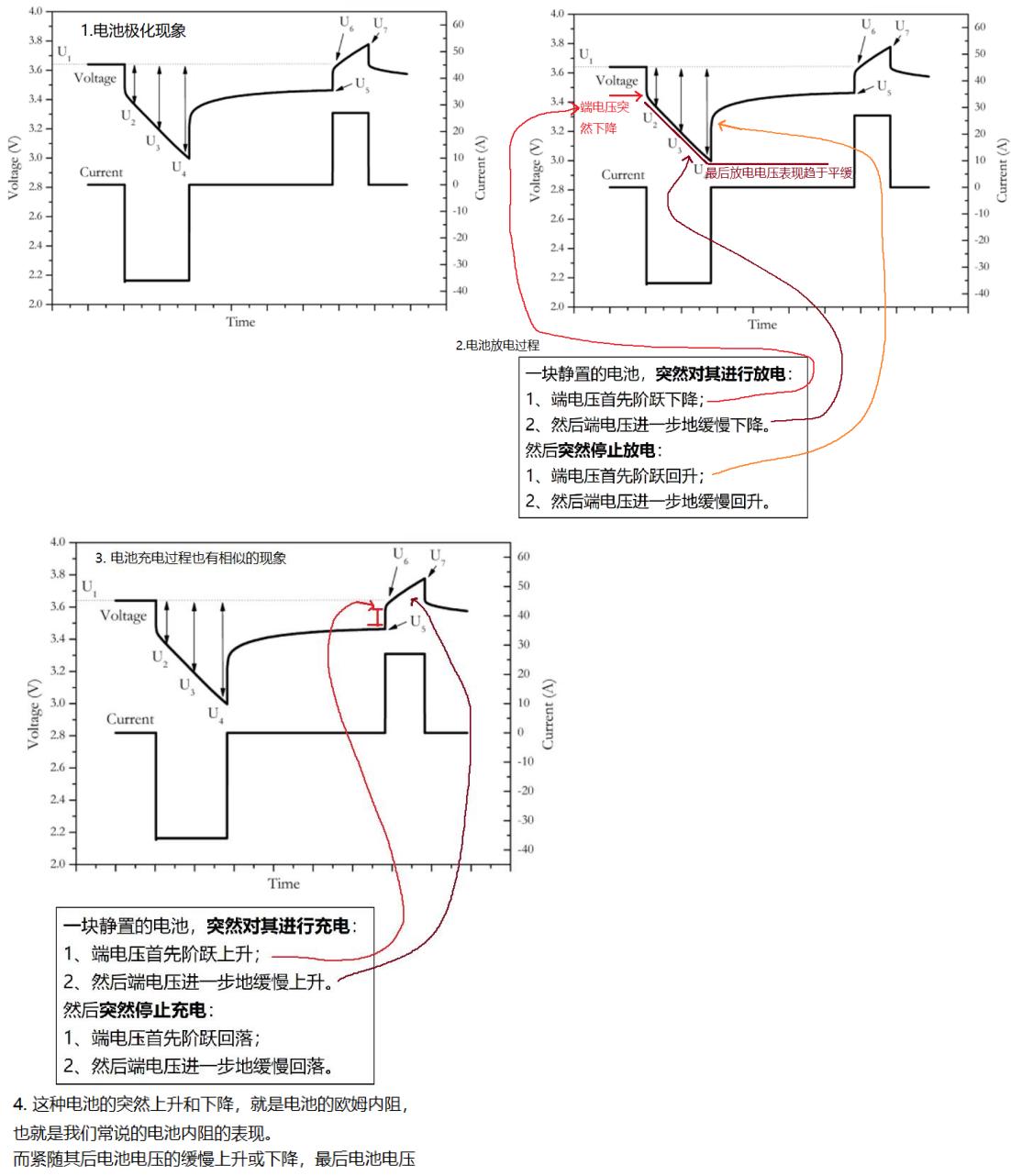




- 问：电池在放电过程中，由于电池所剩容量降低，电压也会下降。所以，你测出来的“放电时间越长，换算出来的直流内阻越高”的现象，主要是由于电池电量下降导致的？？？
- 答：这种理解是错误的！电池放电过程的电压下降主要由三个因素引起，根据响应时间尺度由小到大，可以分为：欧姆内阻压降、极化作用压降、容量降低导致的压降。
  - > 欧姆内阻压降：电池等效电路中 $R_0$ 上的压降，瞬时
  - > 极化作用压降：电池等效电路中多个RC串并联支路的总压降，其中C可以是恒相位分数阶元件CPE。稍慢
  - > 容量降低导致的压降：电池放电过程中，所剩容量逐渐降低，导致内电势 $U_{ocv}$ 降低，进而导致外端口电压下降。最慢。
- 即使以1C电流放电测试，持续10s，也仅仅放出了0.278%的容量。如此小的电量变化，对内电势 $U_{ocv}$ 的影响可忽略不计，所以，放电过程电压下降主要由欧姆内阻、极化作用导致
- 根据电池在短时恒流放电过程中的电池电压下降情况测得的电池直流内阻，的确与电池的交流阻抗之间存在一定的联系
  - > 两者之间的联系为：用开始恒流放电后间隔时间t测得的电池端电压，除以放电电流得到的直流内阻，近似等于频率为 $f=1/(2\pi t)$ 处的交流阻抗模
  - 例如：若要近似测量1kHz的交流阻抗，需要在开始放电后159.15μs的时刻测得的电池电压  
若在开始放电后3s的时刻测得的电池电压，换算成的直流内阻对应的是约0.053Hz处的交流阻抗  
若在开始放电后1s的时刻测得的电池电压，换算成的直流内阻对应的是约0.159Hz处的交流阻抗
- 测试时所用的放电电流波形，对测量结果的准确性有着显著的影响；若电流上升速度过慢、从开始上升达到稳定之间的时间过长，则通过直流内阻换算得到的交流阻抗曲线与实际曲线之间的偏差较大
  - > 为测得准确性较高的结果，需要：
  - 电流上升速率较快、达到稳定所用时间较短的恒流负载
  - 采样速率较高、分辨率较高的示波器或数据记录仪
- 以上测试条件，业余的DIY工作室很难具备，一般难以实现，且即使测出来之后，也无法获得交流阻抗相角，无法分离出实部虚部
  - > 不如用内阻测试仪或LCR电桥，直接测量交流阻抗



## 为什么选择 1khz 测试频率测量电池内阻?



## 电池内阻（欧姆内阻）的计算：

$$R_{ohmic} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

**ΔU：端电压阶跃突变值**

**ΔI：电流阶跃突变值**

5. 这种测试方法也是比较标准的电池内阻测量方法。

但是这种测试方法需要大电流脉冲以及速度较

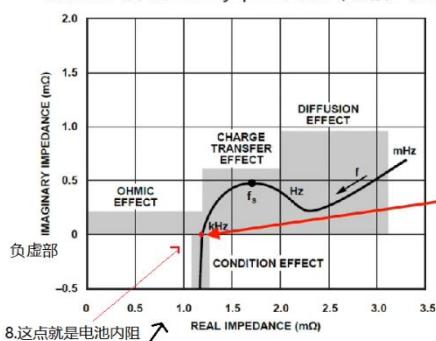
快，精度更高的端电压采集系统。

所以这种方法并不常用，这种方法是基于时域

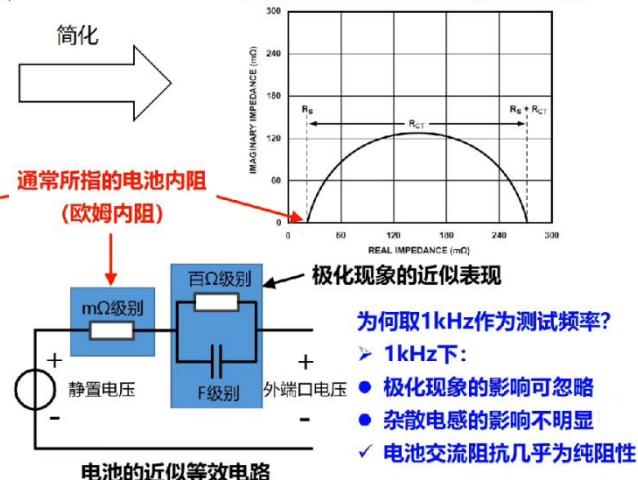
的电池内阻测试方法。

## 6. 频域测试方法

电池的小信号阻抗Nyquist曲线 (纵轴: 负虚部)

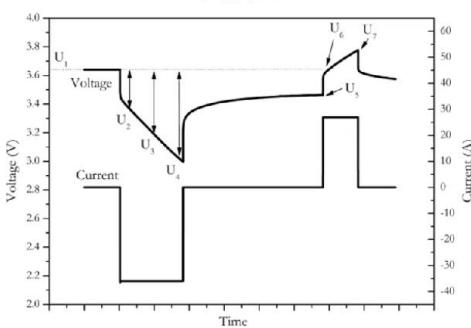


简化的电池阻抗曲线 (纵轴: 负虚部)



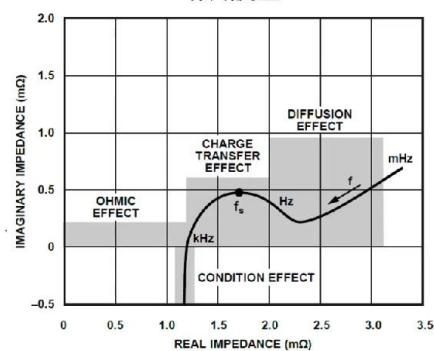
## 电池内阻，时域测量VS频域测量

时域测量



- ✓ 属于标准的测试方式;
- ◆ 需捕捉电压/电流快速阶跃信号，采样速率要求高;
- ◆ 电压值变化幅度小，采样精度、分辨率要求高;
- ◆ 大电流脉冲，需专用仪器。

频域测量



- ◆ 并非标准规定的测试方式，测得结果与标准测试结果可能有一定的出入;
- ✓ 小信号激励下的测量，无需高脉冲电流等大信号
- ✓ 可用普通的LCR测试仪实现测量。

## 简单的直流测电池方式测量内阻

锂电池内阻测量可采用**直流内阻测量方法 (DCR)** 和交流内阻测量方法 (ACR) 两种。直流内阻测量方法是测试设备让电池在短时间内（一般为 2~3 秒）强制通过一个很大的恒定直流电流（一般使用 40A~80A 的大电流），测量此时电池两端的电压，并按公式计算出当前的电池内阻。通过公式计算出电池的直流内阻。然而，这方法存在一些问题，如果长时间通过大电流电池内部的电极会发生极化现象，出现极化内阻，影响结果的可靠性。

$$R = \frac{U}{I}$$

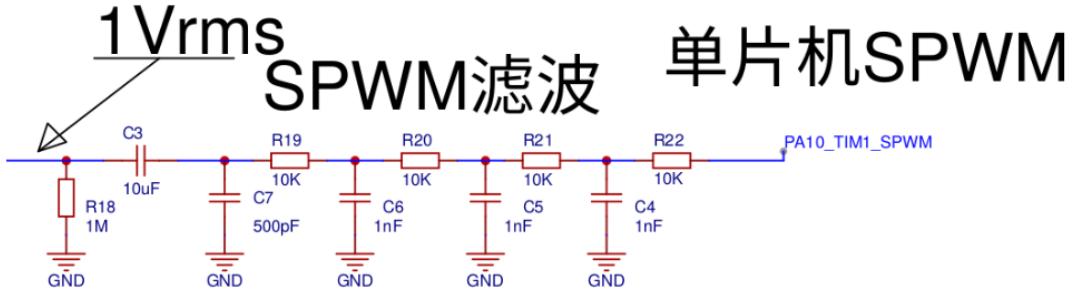
恒定电流通电2~3秒，这时测量电池端电压  
I 为通过电池恒定电流40A~80A任意取一个

这种测量方法的精确度较高，控制得当的话，测量精度误差可以控制在0.1%以内。但此法有明显的不足之处：

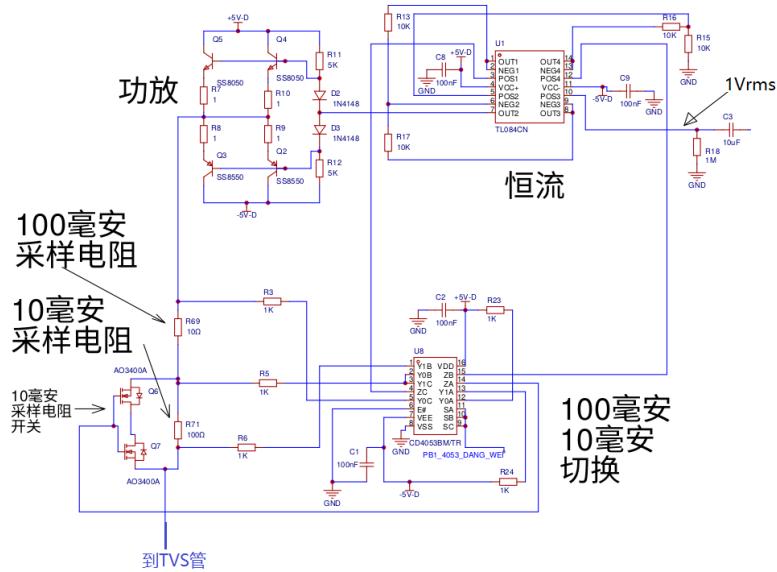
- (1) 只能测量大容量电池或者蓄电池，小容量电池无法在2~3秒钟内负荷40A~80A的大电流；
- (2) 当电池通过大电流时，电池内部的电极会发生极化现象，产生极化内阻。故测量时间必须很短，否则测出的内阻值误差很大；
- (3) 大电流通过电池对电池内部的电极有一定损伤。

## 标准做法用交流测量电池内阻

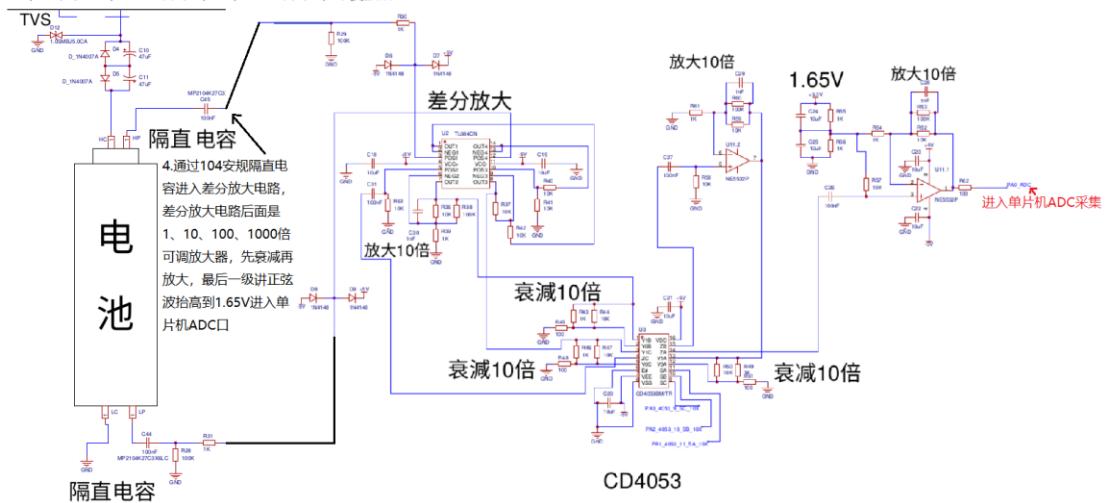
1. 单片机SPWM经过RC滤波产生1KHZ正弦波



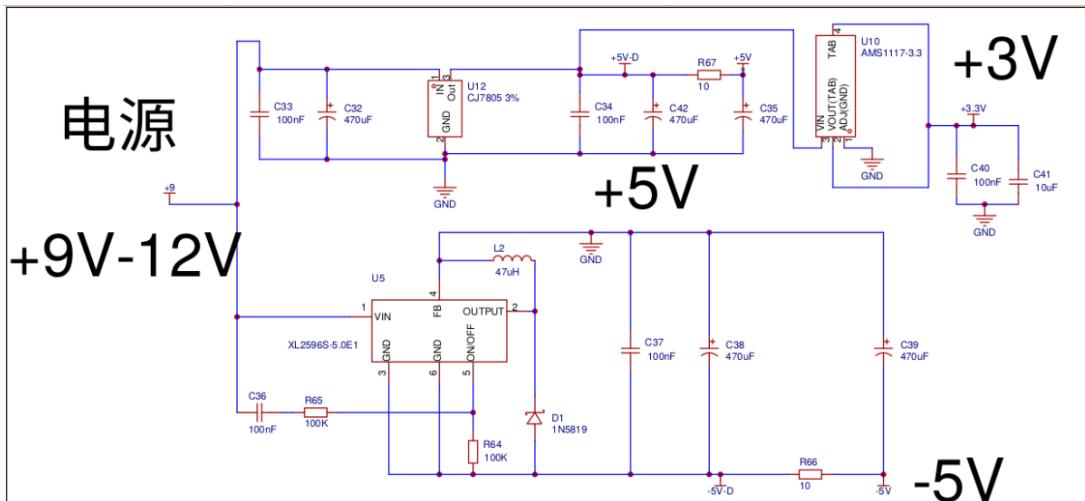
2. 接着进入恒流电路，分为100毫安和10毫安两个档位，100毫安采样电阻是10欧，10毫安采样电阻是100欧，通过MOS管和4053模拟开关切换切换



3. 下面通过电容隔离电池直流电压，通过开尔文夹连接，注意HC和LC线要缠绕在一起，HP和LP线要缠绕在一起，不然HC、LC线产生的磁场会耦合到HP、LP。。HC、HP一个夹子，LP、LC一个夹子，不要接错了！



电源部分采样9-12V输入，7805产生+5V，LM2596产生-5V，10欧和470UF电容RC滤波后给放大电路供电



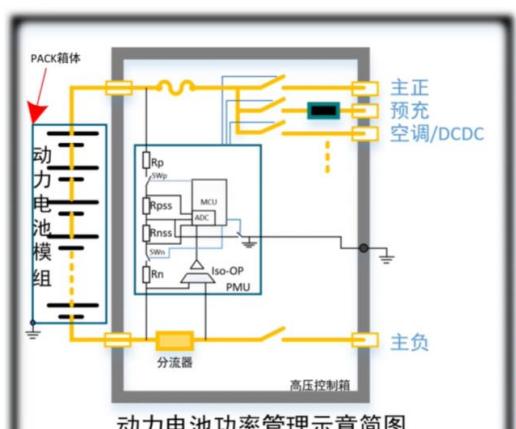
最后加个单片机电路 ADC 采集，价格显示屏显示就是了。

## 电池绝缘电阻检测

绝缘检测是判断动力(正、负)总线与外壳“地”是否存在连接

一些意外情况会发生绝缘故障，比如高压插件老化、积灰、进水、动力走线不合理因(车辆运行)震动摩擦发生破皮

绝缘故障其实也是“电阻”从动力线回路异常“搭”到了不该“搭”的地方(比如PACK包、车架)



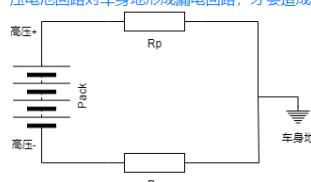
绝缘检测功能

简单来说，绝缘检测就是检测电池包是否漏电

绝缘检测原理

理想状态下，电池包的高压+和高压-对车身地的绝缘阻值应该  $\infty$

Rn、Rp只要有一方阻值足够大，车身地与电池不形成导电回路，那么它们之间就是绝缘的。只有当Rn、Rp绝缘阻值同时降到一定值，高压电池回路对车身地形成漏电回路，才会造成短路的情况。



绝缘电阻检测的常用方法

不平衡电桥法

在每一侧增加了一路开关和一个电阻，通过交替切换两侧的开关改变两极对地的等效电阻，得到正、负极检测电阻上不平衡的检测电压，从而计算出正负极的绝缘电阻，正负极检测电阻上的电压随着开关切换周期变化，当某一极绝缘电阻变低时该侧检测电阻电压变小，对应另一侧检测电阻的电压变大。

优点是能准确的检测正负极的绝缘电阻，缺点是切换开关后电路需要等待一段时间达到稳定，相对来说检测时间长。

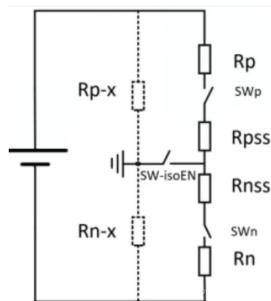
## 绝缘电阻

绝缘检测的目的是计算绝缘电阻，当绝缘电阻低于某个阈值，则很可能造成电池短路、漏电，威胁人员安全。

$R_p$  和  $R_n$  在数学上就是两个未知数

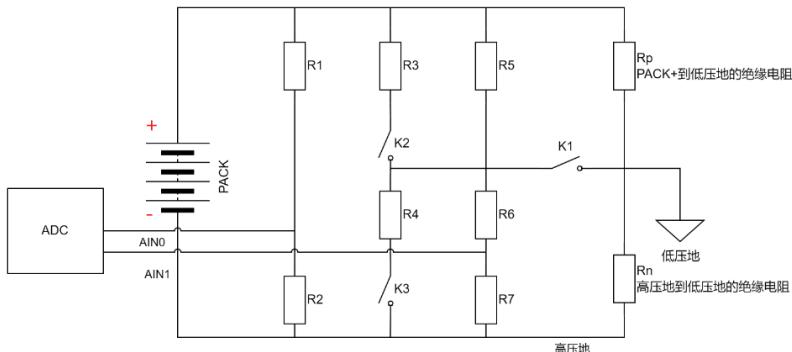
求绝缘电阻就是去求解这两个未知数

因此问题就变成了用电路知识去构建包含  $R_p$  和  $R_n$  的二元一次方程



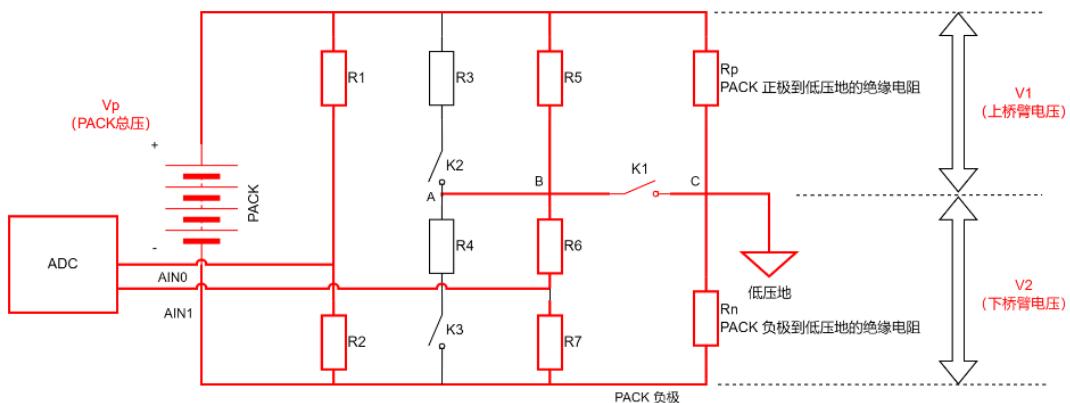
绝缘电阻的计算

以下面绝缘检测方案为例：



绝缘检测前：K1 K2 K3 全部断开

步骤一：闭合 K1，开始绝缘检测，整体电路如下所示



$V_{p+}$ ：代表电池总压

$V_1$ ：代表上桥臂电压，即  $R_5$  或  $R_p$  两端电压

$V_2$ ：代表下桥臂电压，即  $(R_6 + R_7)$  两端电压或  $R_n$  两端电压

$V_{AIN0}$ ：代表  $R_2$  两端电压，从而推导出  $V_{p+}$

$V_{AIN1}$ ：代表  $R_7$  两端电压，从而推导出  $V_2$

根据已知条件列出公式：

$$V_{p+} = V_{AIN0} * \frac{R_1 + R_2}{R_2} \iff V_{p+} = V_{AIN0} + \frac{V_{AIN0}}{R_2} * R_1$$

$$V_2 = V_{AIN1} * \frac{R_6 + R_7}{R_7} \iff V_{p+} = V_{AIN1} + \frac{V_{AIN1}}{R_7} * R_6$$

$$V_1 = V_{p+} - V_2$$

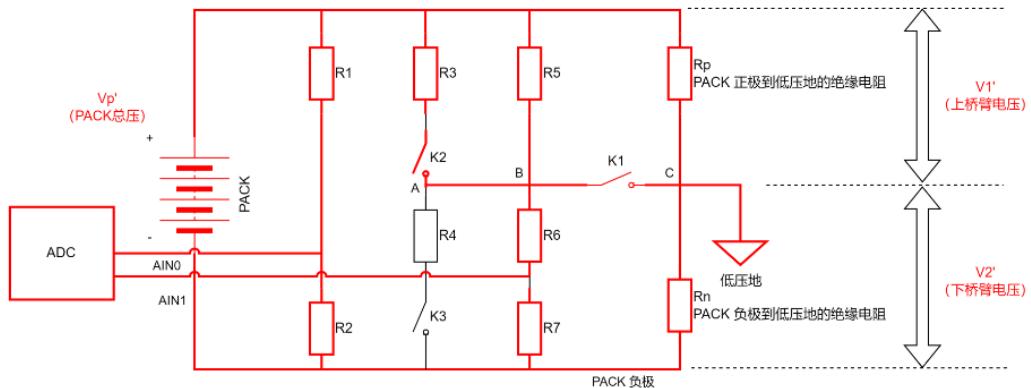
由基尔霍夫电流定理 (KCL) 得

$$\frac{V_1}{R_5} + \frac{V_1}{R_p} = \frac{V_{AIN1}}{R_7} + \frac{V_2}{R_n}$$

## 第二步: $V_1'$ 和 $V_2'$ 的采集与 $R_n$ $R_p$ 电阻的计算

国标中第一次检测出上下桥臂电压后,判断两个电压的大小,来决定第二次并入电阻的位置,即哪个位置电压大,第二次就在这个位置处并入已知电阻

- 若  $V_1' \geq V_2'$ , 闭合  $K_2$ , 接入  $PACK+$  侧辅助电阻  $R_3$ , 重新测得高压地到低压地为  $V_2'$ ,  $PACK+$  到高压地电压  $V_{p+}'$



根据已知条件列出公式:

$$V_{p+}' = V_{AIN0}' * \frac{R_1 + R_2}{R_2} \Leftarrow V_{p+}' = V_{AIN0}' + \frac{V_{AIN0}'}{R_2} * R_1$$

$$V_2' = V_{AIN1}' * \frac{R_6 + R_7}{R_7} \Leftarrow V_2' = V_{AIN1}' + \frac{V_{AIN1}'}{R_7} * R_6$$

$$V_1' = V_{p+}' - V_2'$$

由基尔霍夫电流定理 (KCL) 得

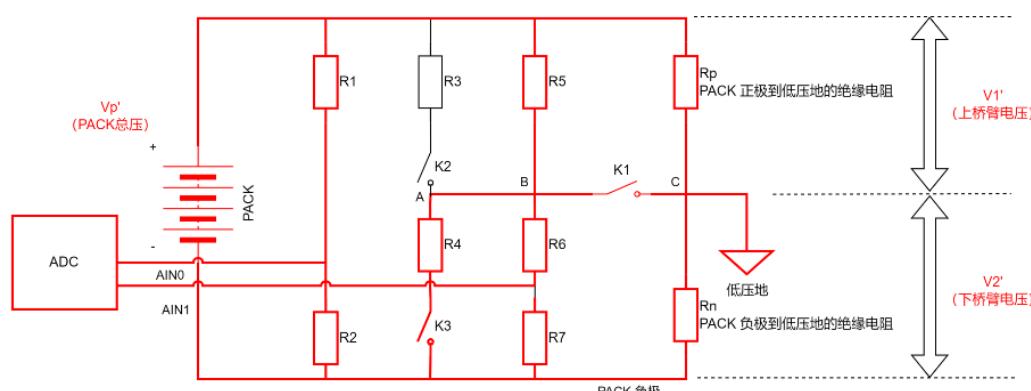
$$\frac{V_1'}{R_3} + \frac{V_1'}{R_5} + \frac{V_1'}{R_p} = \frac{V_{AIN1}'}{R_7} + \frac{V_2'}{R_n}$$

联立方程:

$$\begin{cases} \frac{V_1}{R_5} + \frac{V_1}{R_p} = \frac{V_{AIN1}}{R_7} + \frac{V_2}{R_n} \\ \frac{V_1'}{R_3} + \frac{V_1'}{R_5} + \frac{V_1'}{R_p} = \frac{V_{AIN1}'}{R_7} + \frac{V_2'}{R_n} \end{cases}$$

两个未知数, 两个方程, 求出  $R_p$   $R_n$

- 若  $V_1' < V_2'$ , 闭合  $K_3$ , 接入  $PACK+$  侧辅助电阻  $R_4$ , 重新测得高压地到低压地为  $V_2'$ ,  $PACK+$  到高压地电压  $V_{p+}'$



根据已知条件列出公式：

$$V'_{p+} = V'_{AIN0} * \frac{R_1 + R_2}{R_2} \Leftarrow V'_{p+} = V'_{AIN0} + \frac{V'_{AIN0}}{R_2} * R_1$$

$$V'_2 = V'_{AIN1} * \frac{R_6 + R_7}{R_7} \Leftarrow V'_{p+} = V'_{AIN1} + \frac{V'_{AIN1}}{R_7} * R_6$$

$$V'_1 = V'_{p+} - V'_2$$

由基尔霍夫电流定理 (KCL) 得

$$\frac{V'_1}{R_5} + \frac{V'_1}{R_p} = \frac{V'_{AIN1}}{R_7} + \frac{V'_2}{R_n} + \frac{V'_2}{R_4}$$

联立方程：

$$\begin{cases} \frac{V_1}{R_5} + \frac{V_1}{R_p} = \frac{V_{AIN1}}{R_7} + \frac{V_2}{R_n} \\ \frac{V'_1}{R_5} + \frac{V'_1}{R_p} = \frac{V'_{AIN1}}{R_7} + \frac{V'_2}{R_n} + \frac{V'_2}{R_4} \end{cases}$$

## 绝缘检测开启或关闭

1. 发生热失控和碰撞故障时，关闭绝缘

发生热失控时，一般代表电池包要燃烧起来，此时检测无效，甚至导致进一步恶化

2. 开始充电时，关闭绝缘检测

充电时，充电桩会检测绝缘

## 为什么根据 $V1 < V2$ 或 $V1 \geq V2$ 判断是上桥臂并入电阻还是下桥臂并入电阻

目的：减少误差

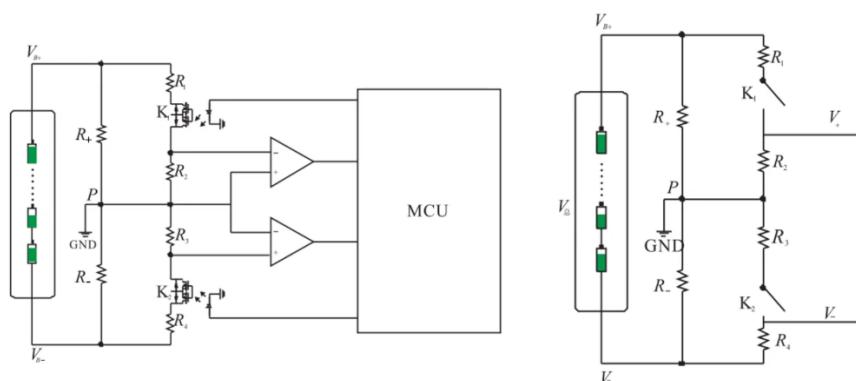
$V2 : VAIN1 = (R6 + R7) : R7$

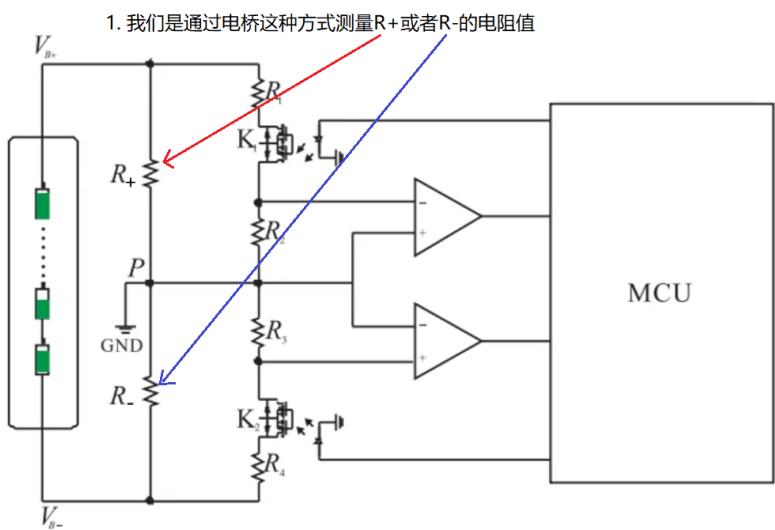
$V2$  越大，意味着容忍的误差越大

$V2$  越小，意味着容忍的误差越小， $VAIN1$  微小的误差就会被放大很多倍

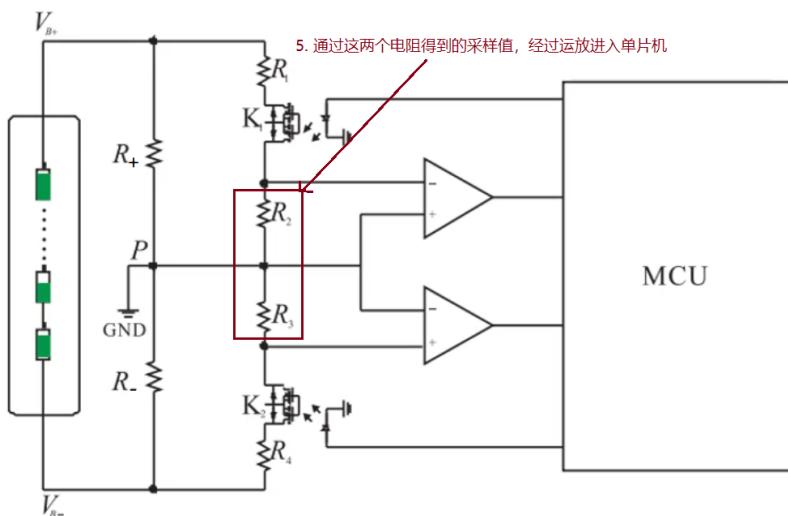
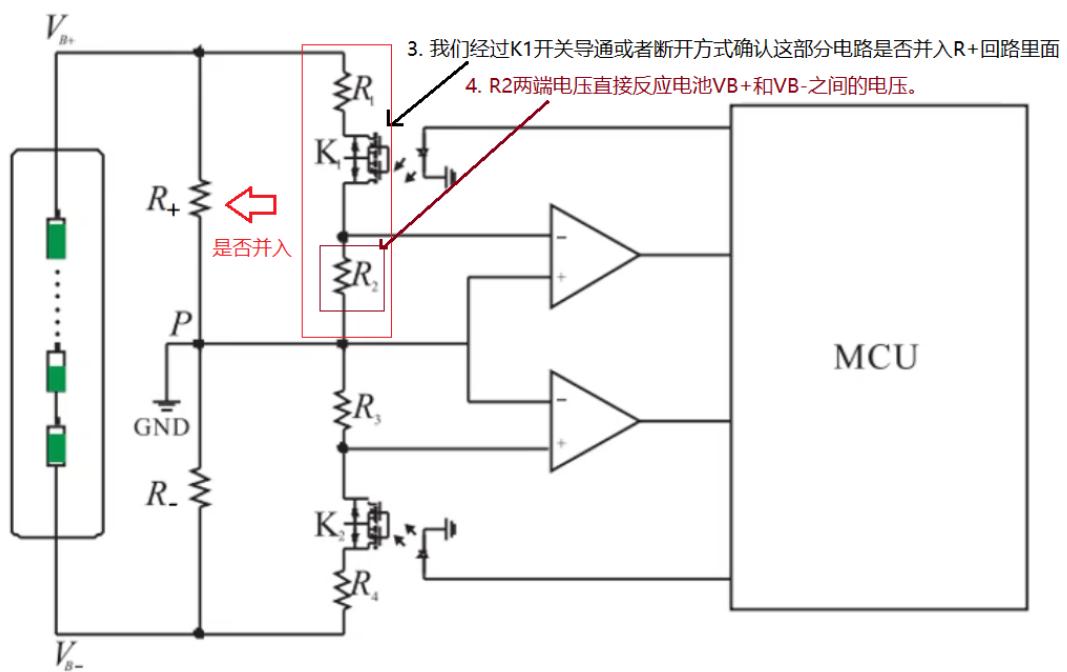
以上就是用电桥测量法来测量电池的绝缘电阻

## 不平衡电桥测量电池绝缘电阻的实际应用

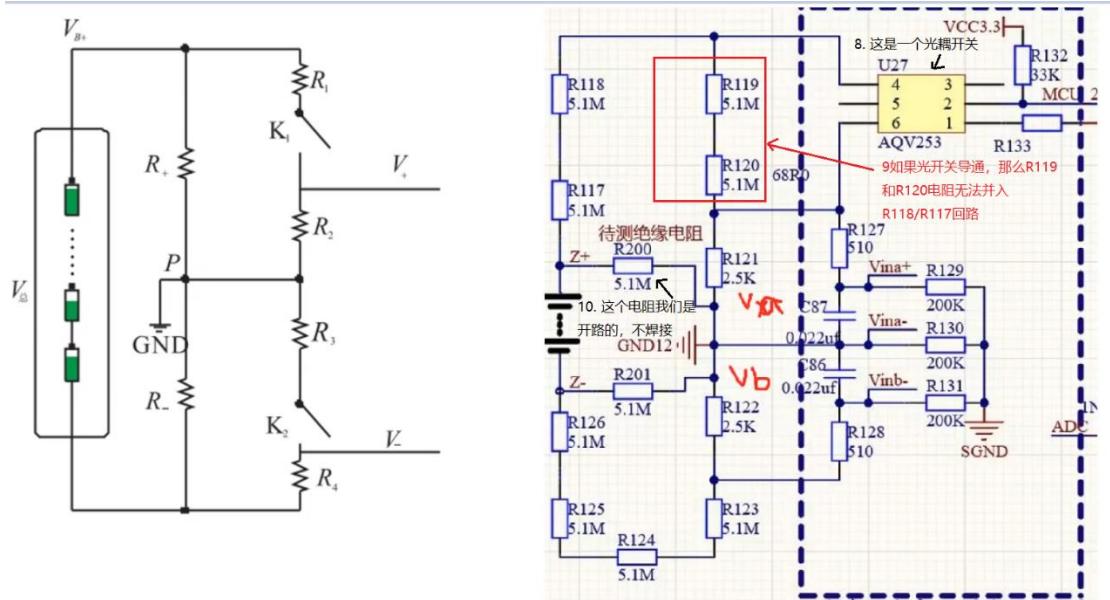
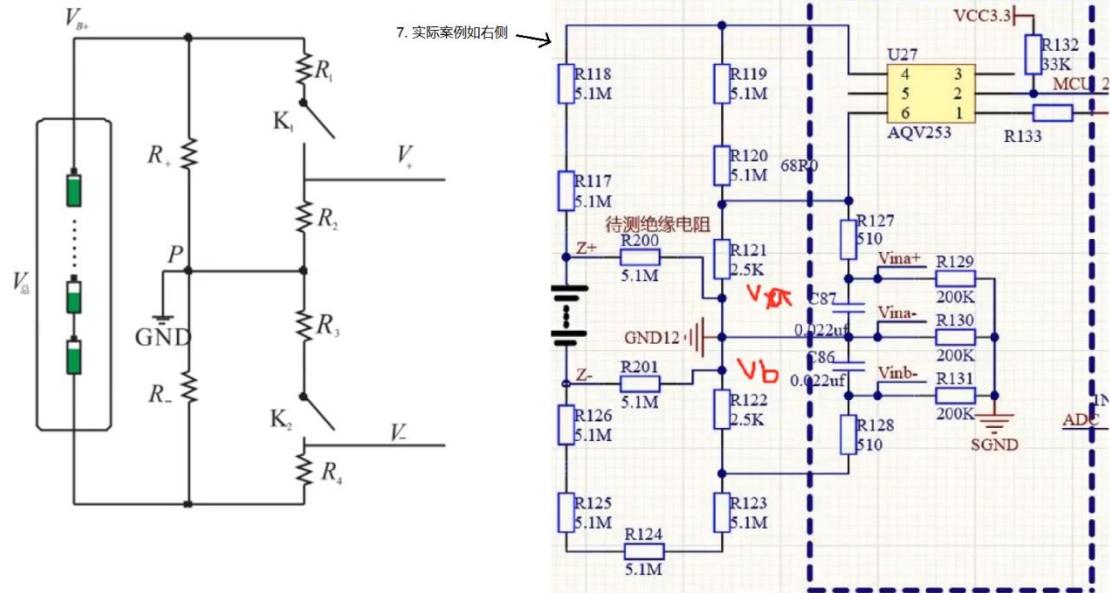
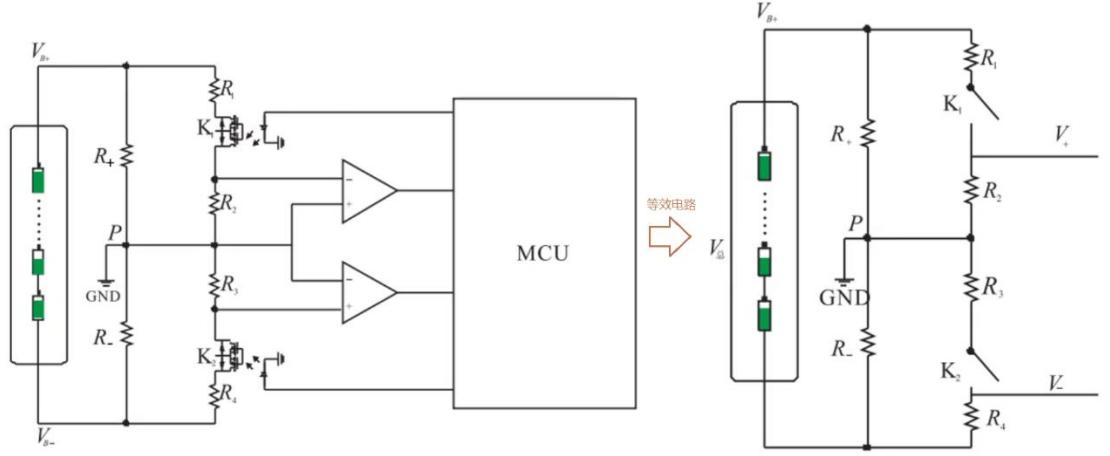


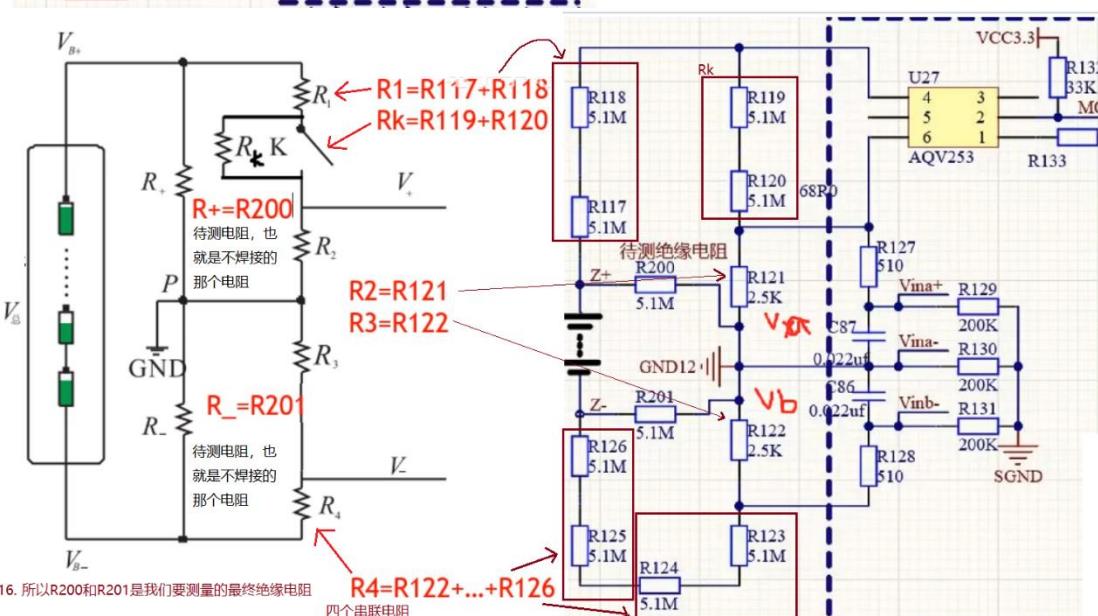
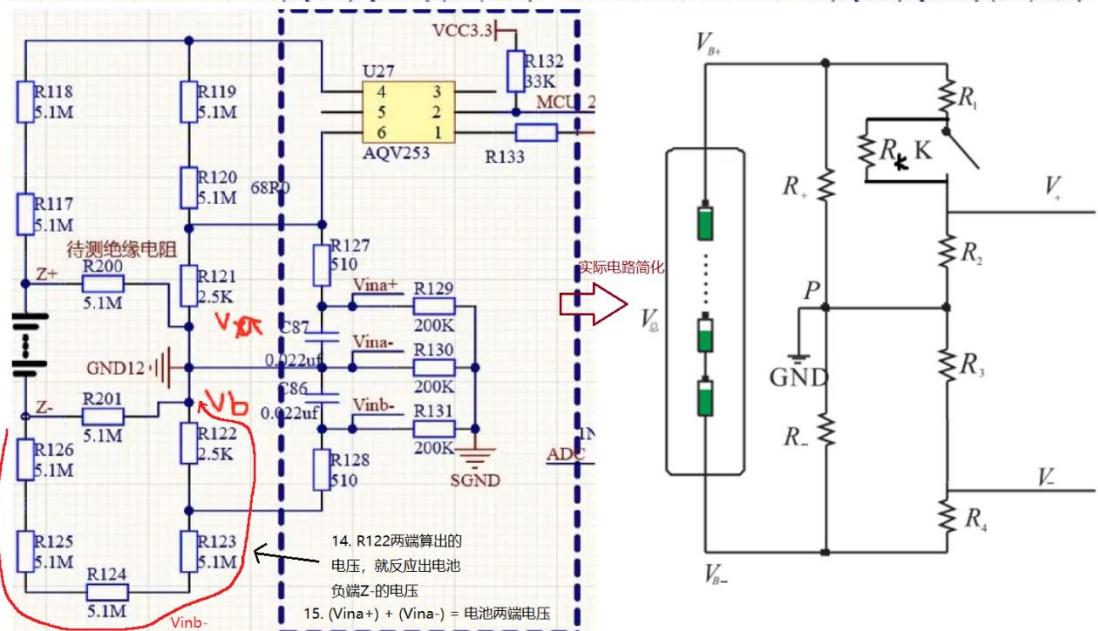
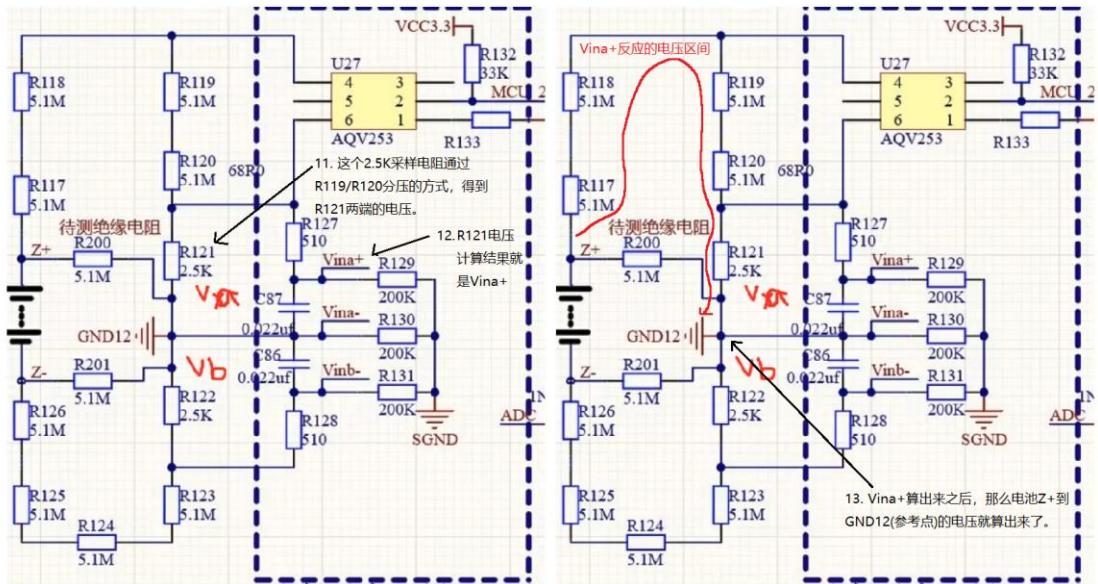


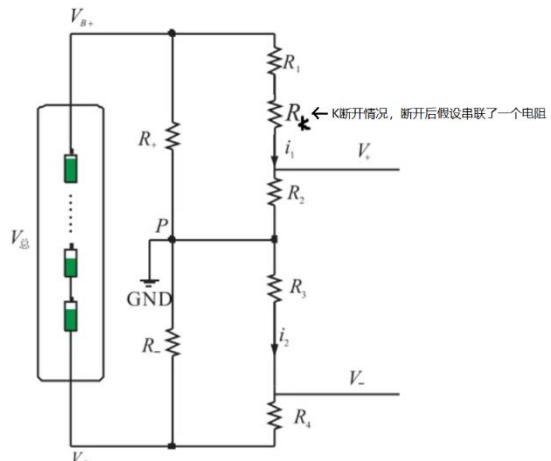
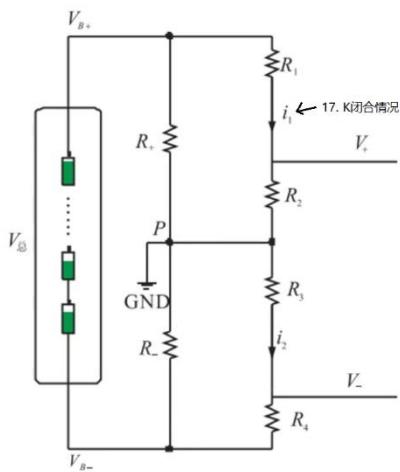
2. R+和R-就是指电池正端，或者负端绝缘电阻。



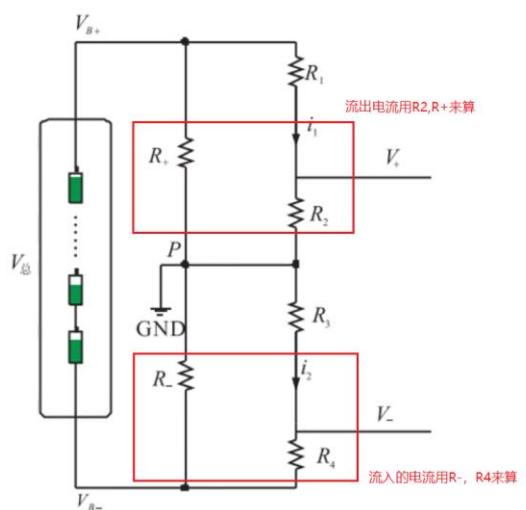
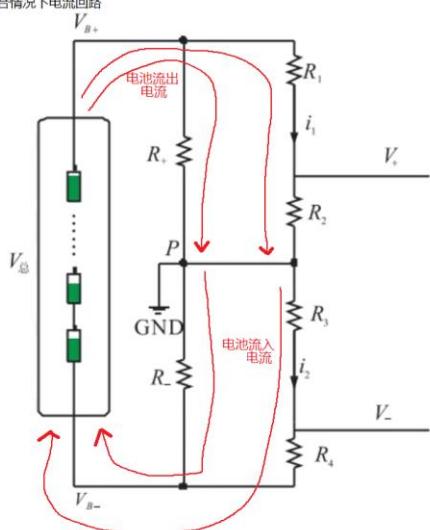
6. 有了R2和R3测量出来的电压值，就可以反算出R+和R-的值





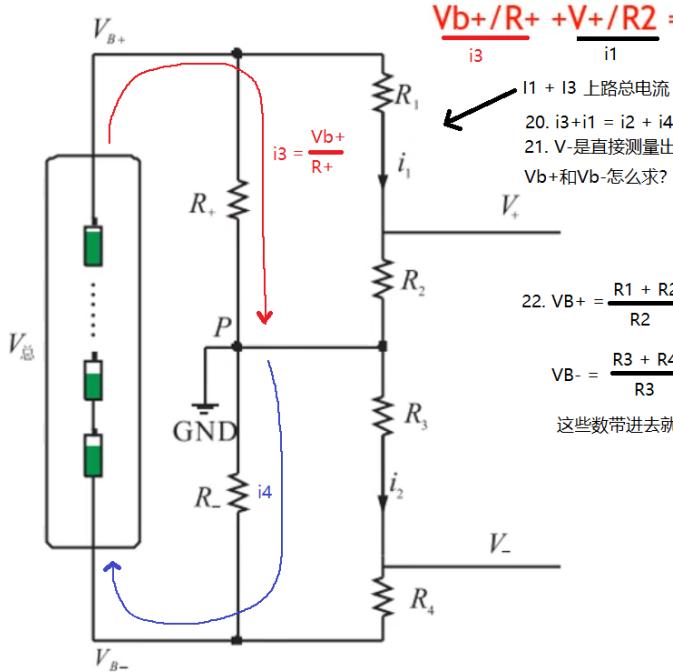


18 K闭合情况下电流回路



19. 流出电流和流入电流这样计算之后，理论上应该流出电流 = 流入电流，这样可以列方程了

$$\frac{V_{B+}/R_+ + V_+/R_2}{i_3} = \frac{V_{B-}/R_- + V_-/R_3}{i_2}$$

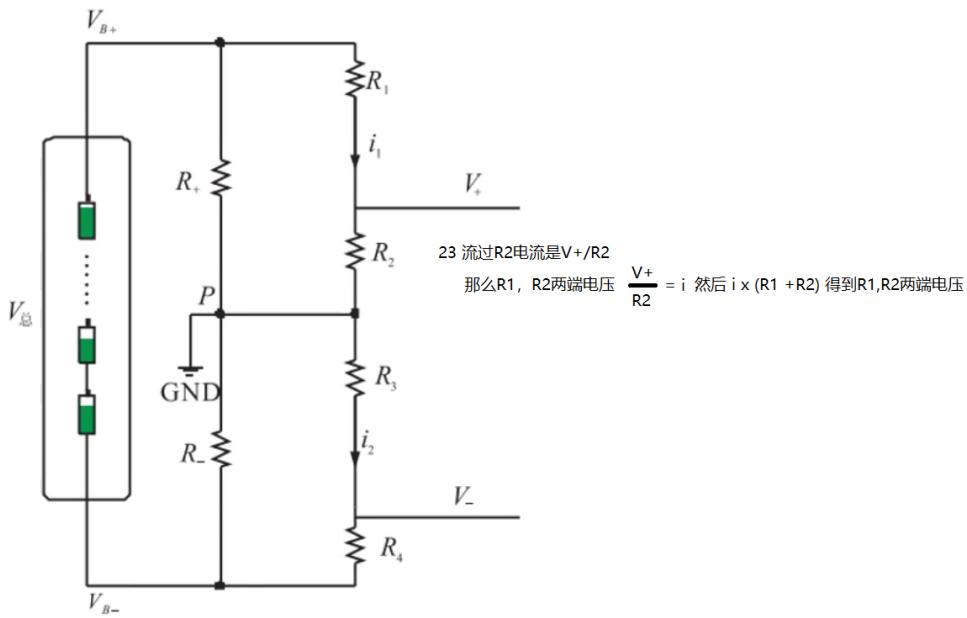


i1 + i3 上路总电流  
20.  $i_3 + i_1 = i_2 + i_4$   
21.  $V_-$ 是直接测量出来的， $V_{B+}$ 是我们要求的， $V_+$ 也是已知的数。所以  $V_{B+}$  和  $V_{B-}$  怎么求？

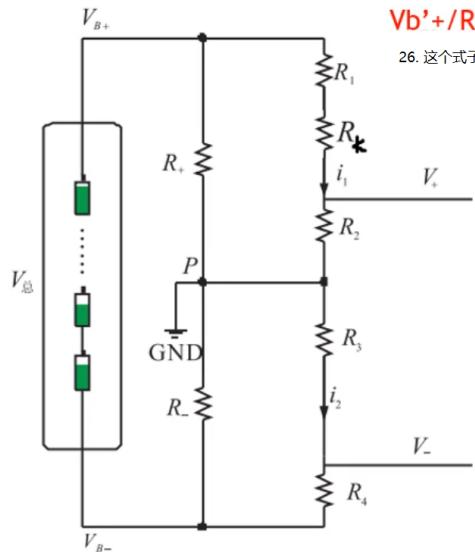
$$22. V_{B+} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} * V_+$$

$$V_{B-} = \frac{R_3 + R_4}{R_3} * V_-$$

这些数带进去就只剩下  $R_+$  和  $R_-$  了



24. K断开之后计算



25. 断开计算的电压, 我们都加上

$$V_{b'+}/R_+ + V_+/R_2 = V_{b'-}/R_- + V_-/R_3$$

26. 这个式子也是R+和R-是未知数, 其余都可以是已知数。

$$V_{b+}/R_+ + V_+/R_2 = V_{b-}/R_- + V_-/R_3$$

$$V_{b'+}/R_+ + V_+/R_2 = V_{b'-}/R_- + V_-/R_3$$

27. 将这K导通和断开的式子联立方程, 就得到R+和R-的绝缘电阻值。

## 不平衡电桥测量电池绝缘电阻仿真

### 使用场景

在GB/T 18384-2020中规定BMS需要对动力电池系统所有部件集成完毕的状态下进行绝缘检测, 且采用绝缘电阻阻值来衡量绝缘状态。绝缘电阻可分为总正对地和总负对地。这时一般使用不平衡电桥法(由于国标GB/T 18384-2020中推荐此种方法, 因此也称国标法)来对绝缘电阻进行测量。

目前很多储能方面的BMS在定绝缘检测的报警阈值时, 一般是参考借鉴了汽车BMS的相关标准, 比如GB/T 18384-2020中对于REESS的绝缘阻值就有如下规定:

#### 5.1.4 间接接触防护要求

##### 5.1.4.1 绝缘电阻要求

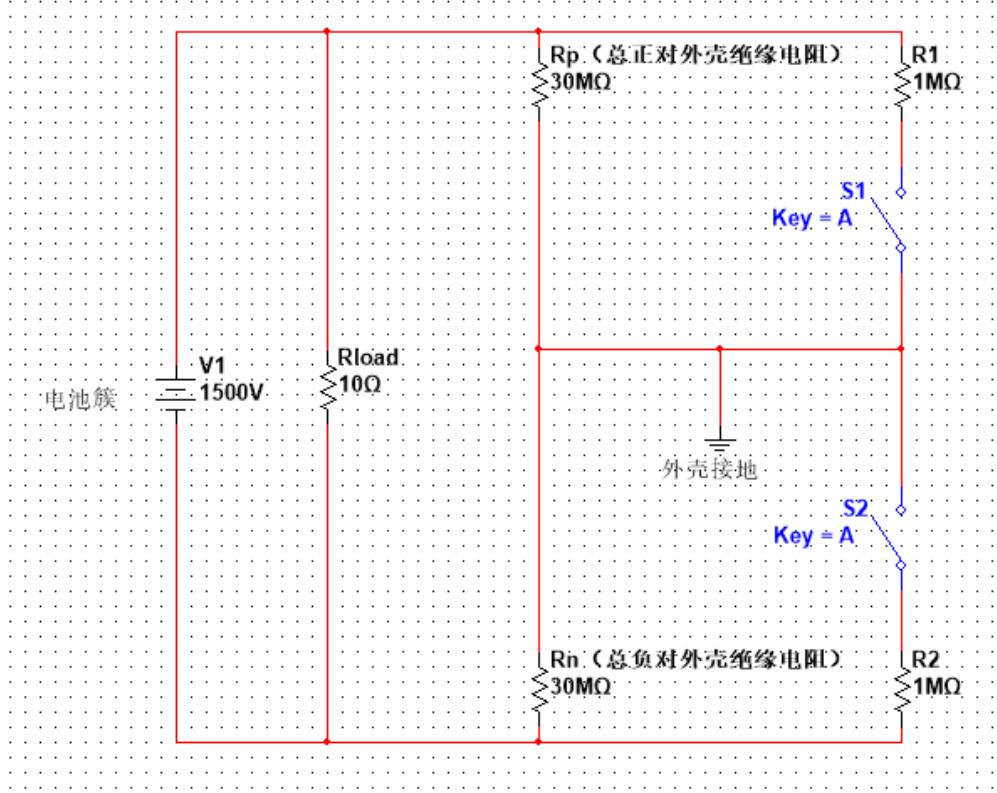
在最大工作电压下, 直流电路绝缘电阻应不小于 $100 \Omega/V$ , 交流电路应不小于 $500 \Omega/V$ 。如果直流和交流的B级电压电路可导电的连接在一起, 则应满足绝缘电阻不小于 $500 \Omega/V$ 的要求。对于燃料电池电动汽车, 如图3中所示。若交流电路增加有附加防护, 则组合电路至少满足 $100 \Omega/V$ 的要求。

附加防护方法应至少满足以下一种要求:

- a) 至少有两层绝缘层、遮栏或外壳; 或
- b) 布置在外壳里或遮栏后, 且这些外壳或遮栏应能承受不低于 $10 \text{ kPa}$ 的压强, 不发生明显的塑性变形。

在储能场景的实践中, 由于电池簇一般由高压箱和若干电池插箱组成, 存在交流电路, 因此一般要求绝缘阻值不小于 $500 \Omega/V$ 。

## 测量原理

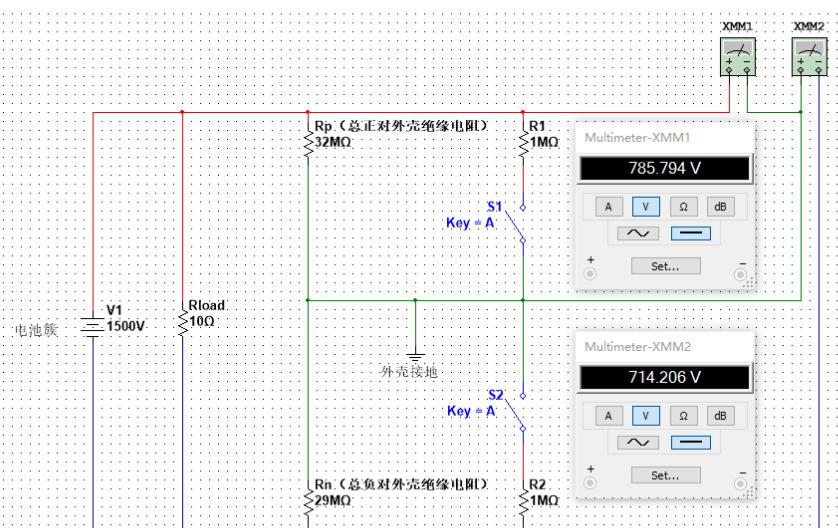


上图为不平衡电桥法测电池簇总正总负对外壳绝缘电阻的原理图：

1. Rload为模拟负载，不需要参与计算；
2. Rp为电池簇总正对外壳的绝缘电阻；R1为并在Rp上的标准电阻，通过S1控制是否并入；
3. Rn为电池簇总负对外壳的绝缘电阻；R2为并在Rn上的标准电阻，通过S2控制是否并入；

测量过程  
实际中，Rp和Rn总是有细微差异的，这里根据上一节的原理图修改下，添加电压测量电路，之后按国标里提的测量流程推导下，看反算出的Rp和Rn是否和我们设置的一致。需要注意的是国标中给的流程只计算出了两个绝缘电阻中相对较小的那个，本文流程将Rp和Rn都计算了。

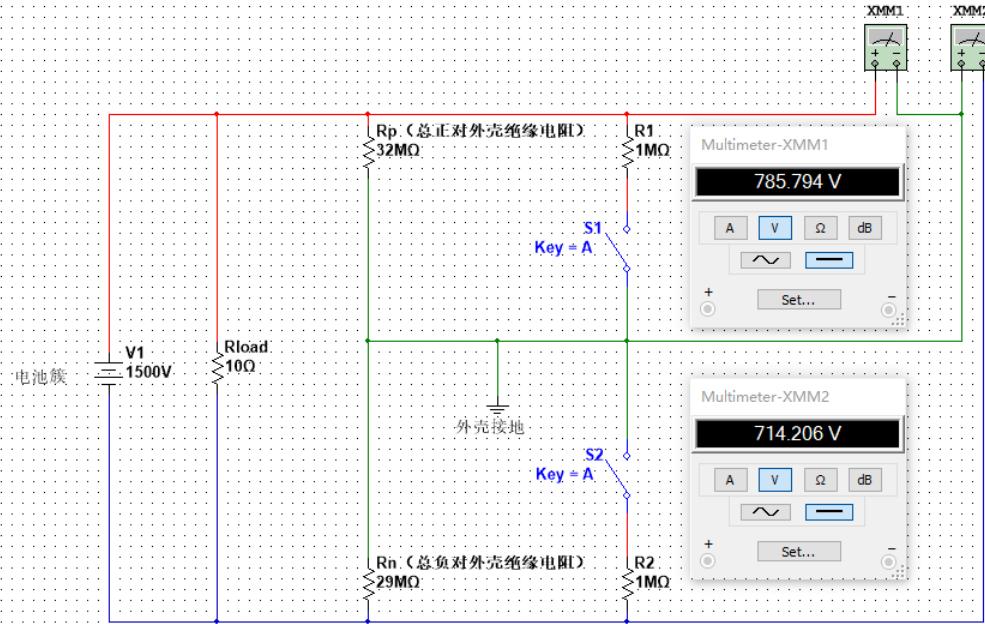
修改后的原理图如下：



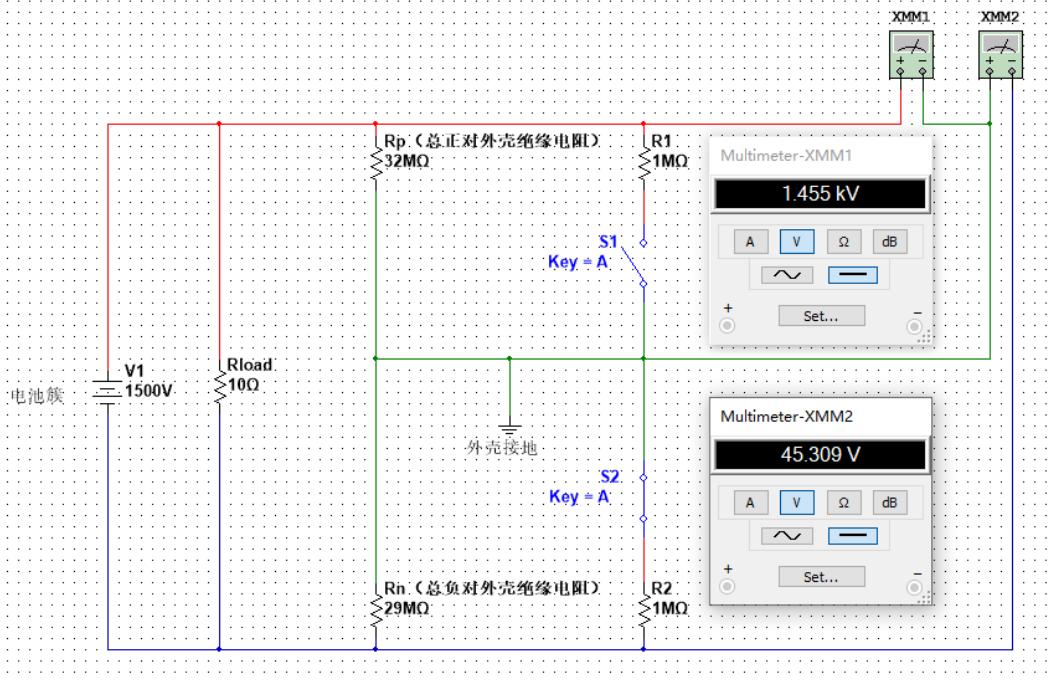
注意！这里以电池负极为零电位参考点，因此后续的Rp和Rn两端的电压均为正值！

以下流程计算总正到外壳地的绝缘电阻Rp：

- 在R1和R2这两个标准电阻断开的情况下，测量Rp和Rn两端的电压，记为Up和Un；此处Up=785.794V, Un=714.206V。  
R1和R2均断开的情况



- 闭合S2来将R2并入，测量Rp和Rn两端的电压，记为Up'和Un'；此处Up'=1455V, Un'=45.309V；  
并入R2的情况



$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1 \times \left( \frac{U_{p'}}{U_{n'}} - \frac{U_p}{U_n} \right)}} - \frac{1}{r}$$

$$R_n = \frac{1}{\frac{1}{R_1 \times \left( \frac{U_{n'}}{U_{p'}} - \frac{U_n}{U_p} \right)}} - \frac{1}{r}$$

Rp: 待求的总正绝缘电阻

Rn: 总负绝缘电阻

R2: 并在总负和接地处的标准电阻

Up': 并联R2后Rp两端的电压

Un' : 并联R2后Rn两端电压

Up: 并联R2前Rp两端电压

Un: 并联R2前Rn两端电压

r: 电压表内阻

Rn: 待求的总负绝缘电阻。

Rp: 总正绝缘电阻。

R1: 并在总正和接地处的标准电阻

Up': 并联R1后Rp两端的电压

Un' : 并联R1后Rn两端电压

Up: 并联R1前Rp两端电压

Un: 并联R1前Rn两端电压

r: 电压表内阻

以下流程计算总负到外壳地的绝缘电阻Rn:

3. 代入计算Rp所用公式来计算Rp的阻值; 此处Rp=32MΩ, 与我们的预设值一致;  
计算Rp所用公式

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1 \times \left( \frac{U_{p'}}{U_{n'}} - \frac{U_p}{U_n} \right)}} - \frac{1}{r}$$

Rp: 待求的总正绝缘电阻

Rn: 总负绝缘电阻

R2: 并在总负和接地处的标准电阻

V1': 并入R2后Rp两端的电压

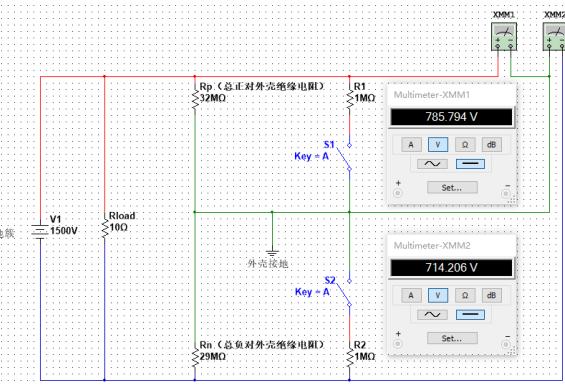
V2': 并入R2后Rn两端的电压

Vp: 并入R2前Rp两端电压

Vn: 并入R2前Rn两端电压

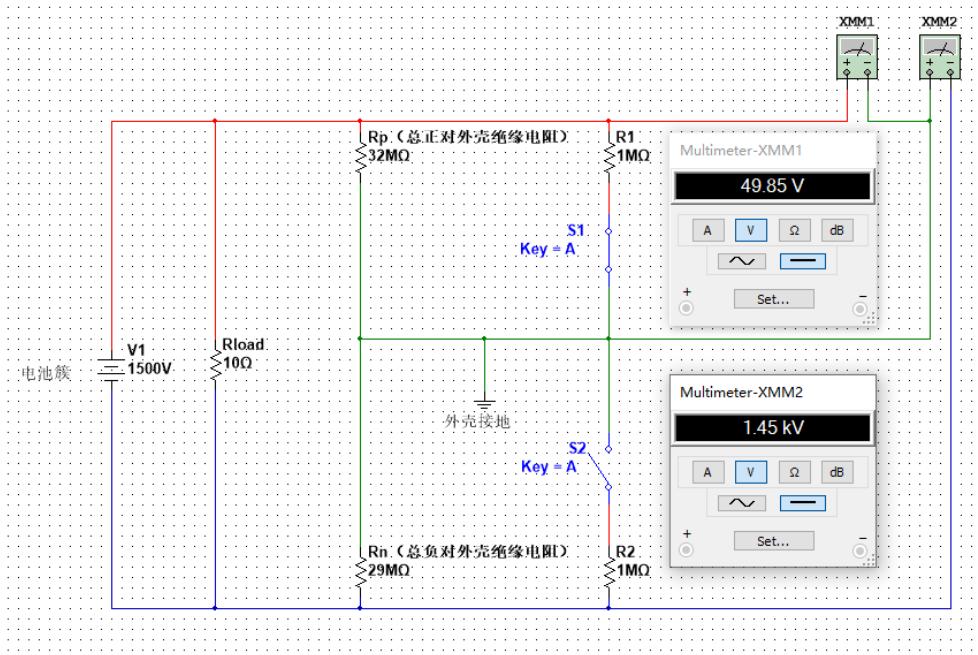
r: 电压表内阻

1. 在R1和R2这两个标准电阻断开的情况下, 测量Rp和Rn两端的电压, 记为Up和Un; 此处Up=785.794V, Un=714.206V。  
R1和R2均断开的情况



2. 闭合S1来将R1并入, 测量Rp和Rn两端的电压, 记为Up'和Un'; 此处Up'=49.85V, Un'=1450V;

并入R1的情况



3. 代入计算Rn所用公式来计算Rp的阻值；此处Rn=29MΩ，与我们的预设值一致；

计算Rn所用公式

$$R_n = \frac{1}{\frac{1}{R_1 \times (\frac{U'_n}{U'_p} - \frac{U_n}{U_p})}} - \frac{1}{r}$$

**Rn**：待求的总负绝缘电阻

**Rp**：总正绝缘电阻

**R1**：并在总正和接地处的标准电阻

**V'\_p**：并入R1后Rp两端的电压

**V'\_n**：并入R1后Rn两端的电压

**Vp**：并入R1前Rp两端的电压

**Vn**：并入R1前Rn两端的电压

**r**：电压表内阻

## 标准电阻取值

对于标准电阻数值的选取，GB/T 18384-2020推荐为1MΩ，猜测主要基于三点考虑：

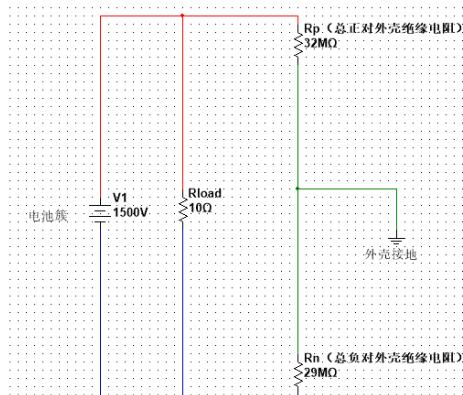
1. 标准电阻的阻值不能太小，因为在工作中也需要进行绝缘检测，因此并接的标准电阻阻值如果太小，一方面是不安全，另一方面是电流过大造成发热和不必要的电池损耗；
2. 标准电阻的阻值不能太大，过大的阻值会导致电阻的精度难以控制，同时并入标准电阻后电压的变化不明显，导致采样和计算环节的误差增大；
3. 总正负对外壳的绝缘电阻一般在几MΩ到几十MΩ之间，采用1MΩ标准电阻，为比较适中的值；

### 附：绝缘电阻反算公式的推导

上面用于计算电阻Rp和Rn的公式是怎么来的呢，这里以推导Rp的计算公式为例来进行说明，Rn的公式推导流程与Rp的基本一致。

注意！这里以电池负极为零电位参考点，因此后续的Rp和Rn两端的电压均为正值！

1. 在标准电阻未接入时，电路可以简化为下图：



此时可以知道未并入标准电阻时的Rp和Rn两端的电压Up和Un的计算公式：

$$U_p = \frac{R_p}{R_p + R_n} \times U_{battery} \quad (1)$$

$$U_n = \frac{R_n}{R_p + R_n} \times U_{battery} \quad (2)$$

3. 将公式(1)除以公式(2)得：

$$\frac{U_p}{U_n} = \frac{\frac{R_p}{R_p + R_n} \times U_{battery}}{\frac{R_n}{R_p + R_n} \times U_{battery}} = \frac{R_p}{R_n} = \frac{R_p}{R_n // R_2} \quad (5)$$

4. 将公式(3)除以公式(4)得：

$$\frac{U'_p}{U'_n} = \frac{\frac{R_p}{R_p + R_n // R_2} \times U_{battery}}{\frac{R_n // R_2}{R_p + R_n // R_2} \times U_{battery}} = \frac{R_p}{R_n // R_2} = R_p \times \frac{R_n + R_2}{R_n \times R_2} = \frac{R_p}{R_2} + \frac{R_p}{R_n} \quad (6)$$

5. 将公式(6)减去公式(5)得：

$$\frac{U'_p}{U'_n} - \frac{U_p}{U_n} = \frac{R_p}{R_2} + \frac{R_p}{R_n} - \frac{R_p}{R_n} = \frac{R_p}{R_2} \quad (7)$$

6. 对公式(7)进行移项整理得：

$$R_p = R_2 \times \left( \frac{U'_p}{U'_n} - \frac{U_p}{U_n} \right) \quad (8)$$

7. 在实际测量中，Rp上测量电压得电压表内阻也要考虑进去，也就是第6步求出的Rp其实是真实的Rp并上电压表的内阻r的阻值，这里

考虑上电压表内阻r，得到最终的计算公式(10)，为方便计算Rp时使用，将除Rp外的其他项移动到右边，得到公式(11)：

$$R_p / r = R_2 \times \left( \frac{U'_p}{U'_n} - \frac{U_p}{U_n} \right) \quad (10)$$

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_2 \times \left( \frac{U'_p}{U'_n} - \frac{U_p}{U_n} \right)} - \frac{1}{r}} \quad (11)$$

## 电池保护板原理

电池组串并联存在的隐患

1.容量不够(用不久)

电池并联



4.0Ah

3.7V

14.8Wh

2小时

2.电压不够

电池串联



2.0Ah

3.7V

7.4V

14.8Wh

1小时



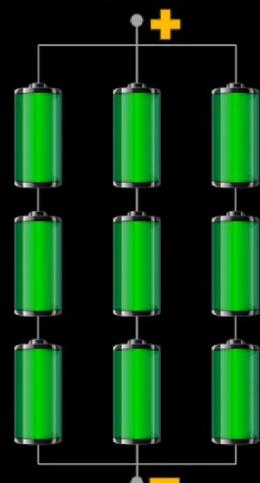
2.0Ah

7.4V

14.8Wh

X

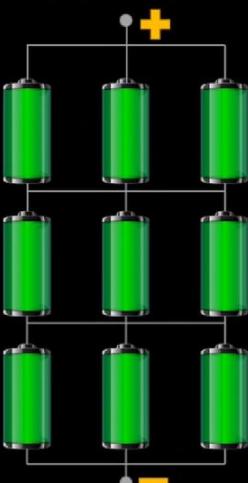
先串再并



3. 先串再并和先并再串，输出电压和容量都是一样的，然而真的是这样吗？



先并再串



影响现实电路的因素

1. 组内不均衡状态 →
2. 电池故障导致断路
3. 电池故障导致短路



12.6V

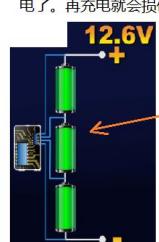
5. 如果是3串锂电池组，就应该充到12.6V。

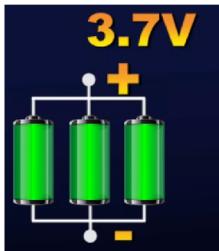
问题就出在串联这儿，因为每个电池都是独立生产的。就算买的是同一批次的电池，每个电池内阻和放电特性还是会有点差异。

7. 中间这个电池明显电压超过单节电池能承受的最大电压4.2V，出现了过充损坏现象。串联电池组放电也是同样的问题。

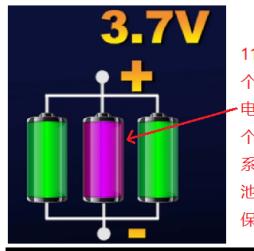
4. 我们知道三元锂电池电压满电是4.2V，当电池充到4.2V就不能再充电了。再充电就会损伤电池。

6. 即使电池电压到了12.6V，有可能每节电池是这样的。  
8. 加装均衡电路就可以解决电池内阻不匹配导致电压差异的问题。均衡电路会控制每个电池的充电电压，保证每个电池都充到4.2V

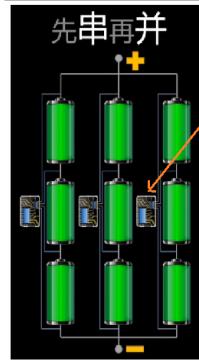




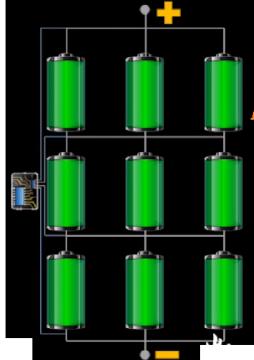
10. 你会发现，并联电池组就不会出现每个电池电压不一致的情况。



11. 这是因为如果某个电池(如中间电池)电压变低了，另外两个电池因为并联的关系，会反向给中间电池充电，让中间电池保持相同电压。



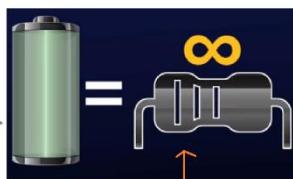
12. 所以在先串再并的电池组中，要做三个均衡板，分别把三个串联电池都做了均衡，再做并联操作。



13. 如果是先并再串，只需要一个均衡板就够了。因为并联之间的电池不存在电压不匹配问题，均衡板主要是控制每一行电池之间的电压不匹配。

### 影响现实电路的因素

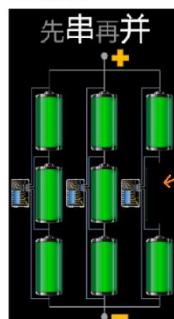
1. 组内不均衡状态 —
2. 电池故障导致断路 —
3. 电池故障导致短路 —



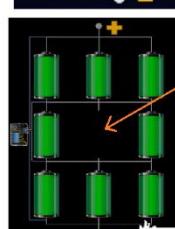
1. 如果在电池组中有单个电池断路了，也就是电池断开了。



2. 如果单个电池在串联电池组断开，整个电池组都会失效，输出为0V.



3. 在三串电池组应用中，如果有一串某个电池断路了。那么这一串电池组都会失效，其它两路还是正常工作。整个电池组少了1/3容量。



4. 如果在“先并在串”的复杂电池组中少了一个电池，整个电池组容量只少1/9，但是依然正常工作，只是非常考验平衡电路的设计。

### 影响现实电路的因素

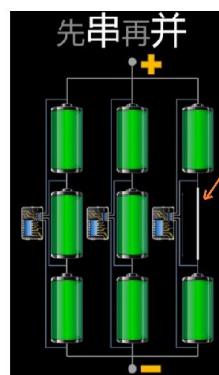
1. 组内不均衡状态 —
2. 电池故障导致断路 —
3. 电池故障导致短路 —



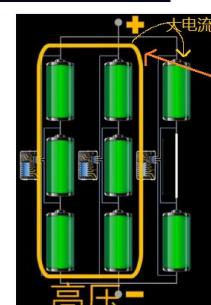
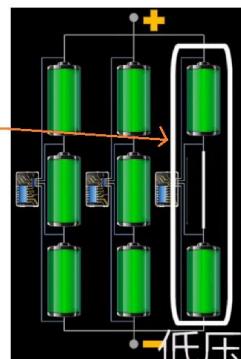
1. 如果串联电池组某个电池短路了，发生故障。



2. 中间电池短路，情况貌似没那么糟糕，只不过电压降低了。

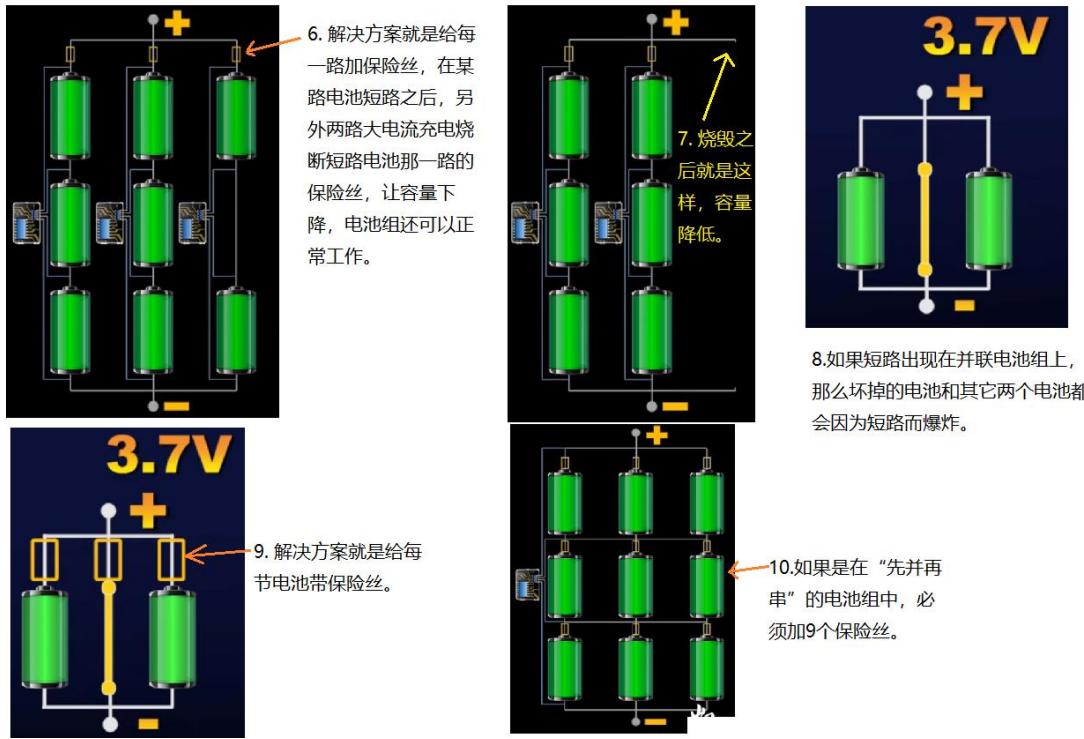


3. 如果在“先串再并”的电池组中，有一路电池短路了。会造成这一路电压降低。



4. 导致另外正常电压的电池组强行大电流给短路的电池组充电。

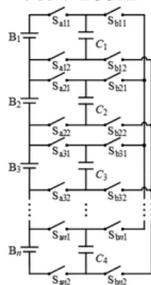
5. 如果这种情况不加干预，且电池还没有爆炸。最后的结果会把两串的电池组充到三串的电压。



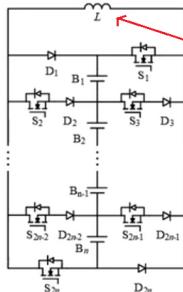
## 电池组均流拓扑讲解

### 1. 均压电路类型拓扑介绍

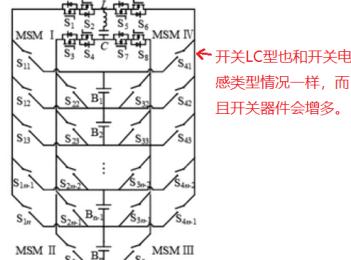
#### 开关电容型



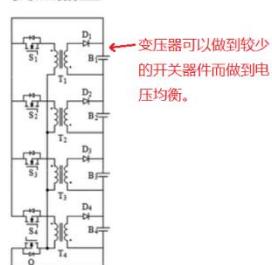
#### 开关电感型



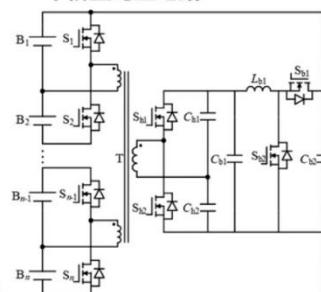
#### 开关LC型



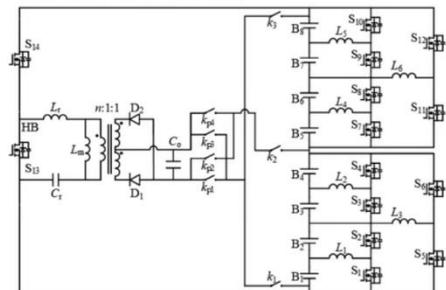
#### 变压器型



#### 半桥型均压电路



#### 变压器谐振型均压电路



#### 半桥结构的优缺点：

##### 优点：

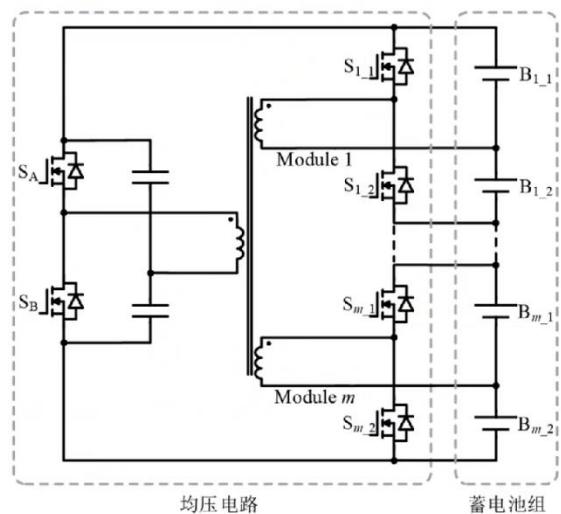
1. 开关少，控制简单；
2. 均压速度较快；
3. 路径灵活；

##### 缺点：

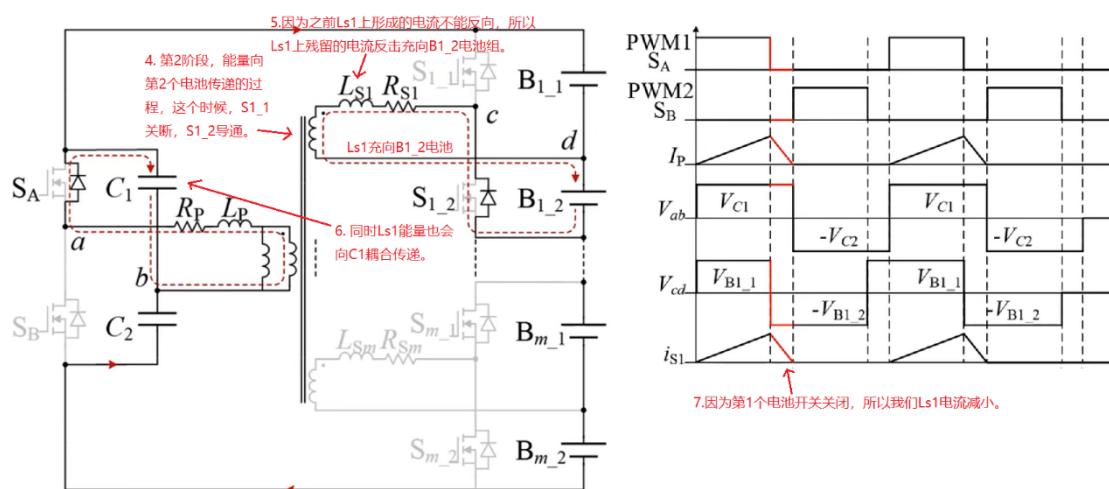
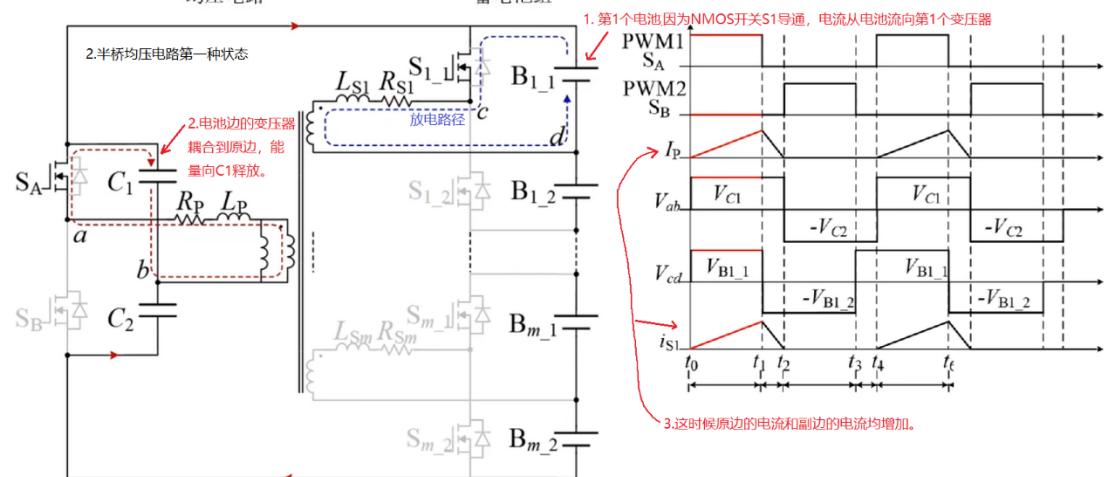
1. 没有软开关，效率低；

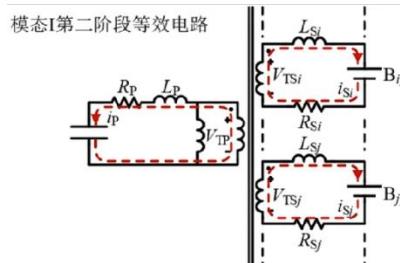
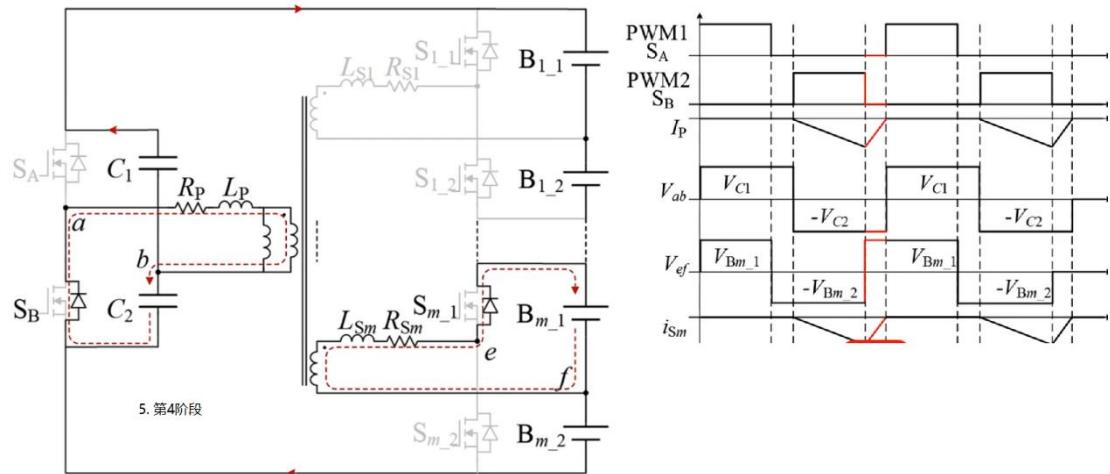
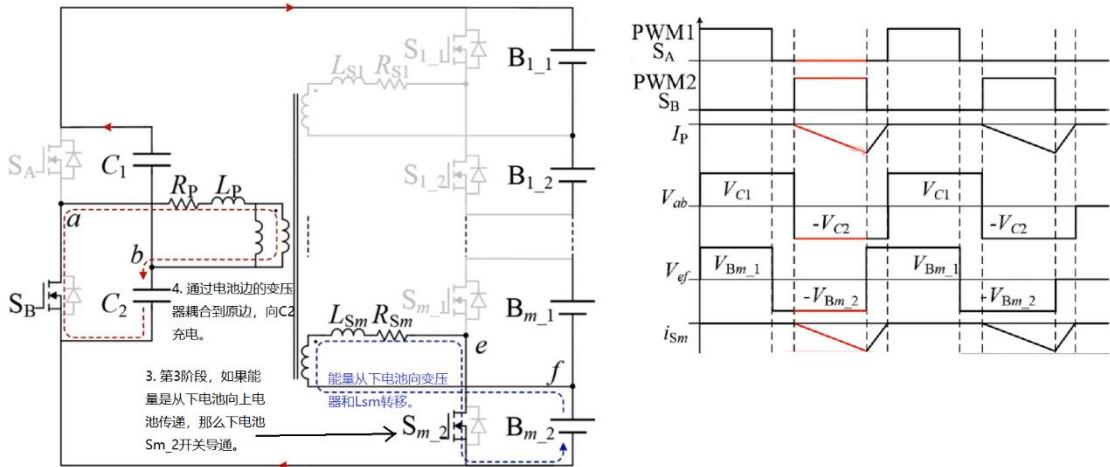
## 多模块半桥隔离型均压电路

## 该拓扑优势



- 1、开关数量少，成本较低，控制相对简单；
- 2、同一时间最多可有半数的电池参与放电，**均压速度较快**；
- 3、通过变压器传递能量，均衡路径短，**效率更高**；





原副边回路可等效为RL电路的全响应

$$\begin{cases} i_{S1_2}(t) = \frac{V_{B1_2} + V_{TS\_2}(t)}{R_S} + \left[ \frac{V_{B1_1} - V_{TS\_1}}{R_S} (1 - e^{-\frac{R_S t}{L_S}}) + \frac{V_{B1_2} + V_{TS\_2}(t)}{R_S} \right] e^{-\frac{R_S t}{L_S}} \\ i_{P\_2}(t) = \frac{V_{C1} - nV_{TS\_2}(t)}{R_P} + \left[ \frac{nV_{TS\_1} - V_{C1}}{R_P} (1 - e^{-\frac{R_P t}{L_P}}) + \frac{V_{C1} - nV_{TS\_2}(t)}{R_P} \right] e^{-\frac{R_P t}{L_P}} \end{cases}$$

$$\text{代入公式 } i_{p,1} = \frac{1}{n} (k_{1_1} i_{S1_1} + \dots + k_{m_1} i_{S1_m})$$

均压前后电池组能量可近似为

$$\begin{cases} E(0) = \frac{1}{2} C_F \cdot \sum_{i=1}^m [V_{B1\_1}(0)^2 + V_{B1\_2}(0)^2] \\ E(\text{end}) = \frac{1}{2} \cdot 2m \cdot C_F V_{ave}^2 \end{cases}$$

线性区均压效率可表示为

$$\eta = \frac{E_{\text{end}}}{E(0)} \times 100\% = \frac{2m \cdot C_F V_{ave}^2}{C_F \cdot \sum_{i=1}^m [V_{B1\_1}(0)^2 + V_{B1\_2}(0)^2]}$$

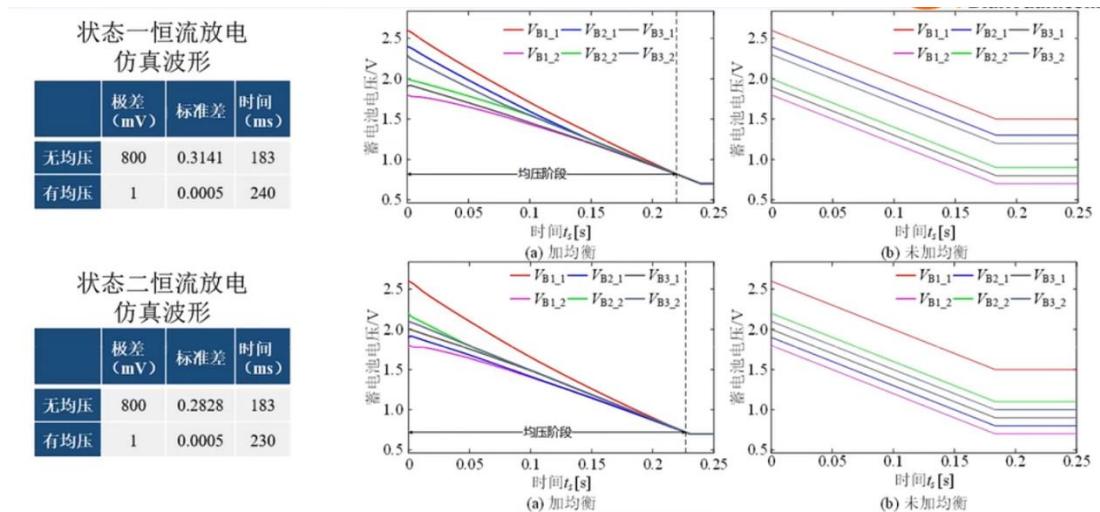
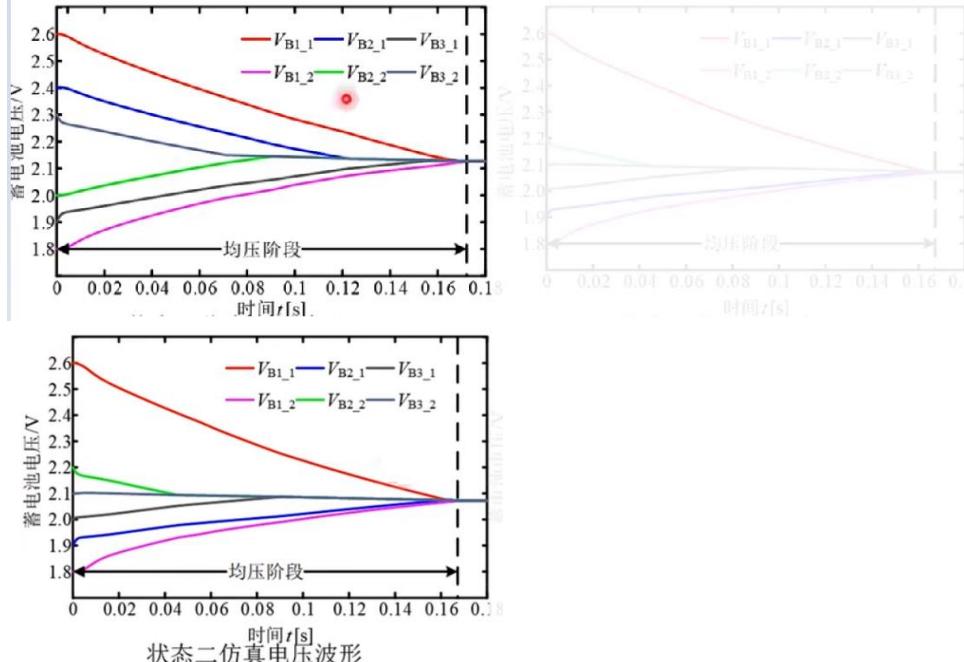
可得变压器副边绕组第二阶段的感应电压

$$V_{TS\_2}(t) = \frac{e^{-\frac{R_S t}{L_S}} \left[ \sum_{i=1}^m k_{i\_2} V_{B1\_2} + \left( \sum_{i=1}^m k_{i\_1} V_{B1\_1} - \sum_{i=1}^m k_{i\_2} V_{TS\_1} \right) (1 - e^{-\frac{R_S t}{L_S}}) \right]}{\sum_{i=1}^m k_{i\_2} + n \left( \frac{n}{R_P} - \frac{n e^{-\frac{R_P t}{L_P}}}{R_P} - \frac{\sum_{i=1}^m k_{i\_2} e^{-\frac{R_S t}{L_S}}}{R_S} \right)}$$

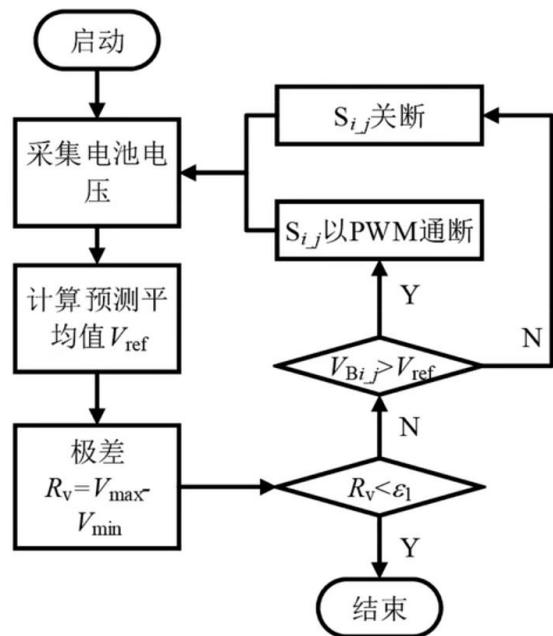
## 均压电路静置仿真验证

仿真参数	数值	均压前	$V_{B1\_1}$ (V)	$V_{B1\_2}$ (V)	$V_{B2\_1}$ (V)	$V_{B2\_2}$ (V)	$V_{B3\_1}$ (V)	$V_{B3\_2}$ (V)	极差(mV)	标准差
变压器变比	4	状态1	2.6	1.8	2.4	2	1.9	2.3	800	0.31411
原副边绕组漏感	$2\mu H$	状态2	2.6	1.8	1.9	2.2	2	2.1	800	0.28284
原边电容	$980\mu F$	状态3	2.6	2.4	2.8	2.5	2	2.7	800	0.28284
开关频率	10kHz	均压后	$V_{B1\_1}$ (V)	$V_{B1\_2}$ (V)	$V_{B2\_1}$ (V)	$V_{B2\_2}$ (V)	$V_{B3\_1}$ (V)	$V_{B3\_2}$ (V)	极差(mV)	标准差
副边电容	0.5F	状态1	2.126	2.126	2.126	2.127	2.126	2.127	1	0.0005
原副边等效电阻	$0.05\Omega$	状态2	2.072	2.072	2.073	2.072	2.073	2.072	1	0.0005
		状态3	2.427	2.428	2.427	2.428	2.427	2.427	1	0.0005

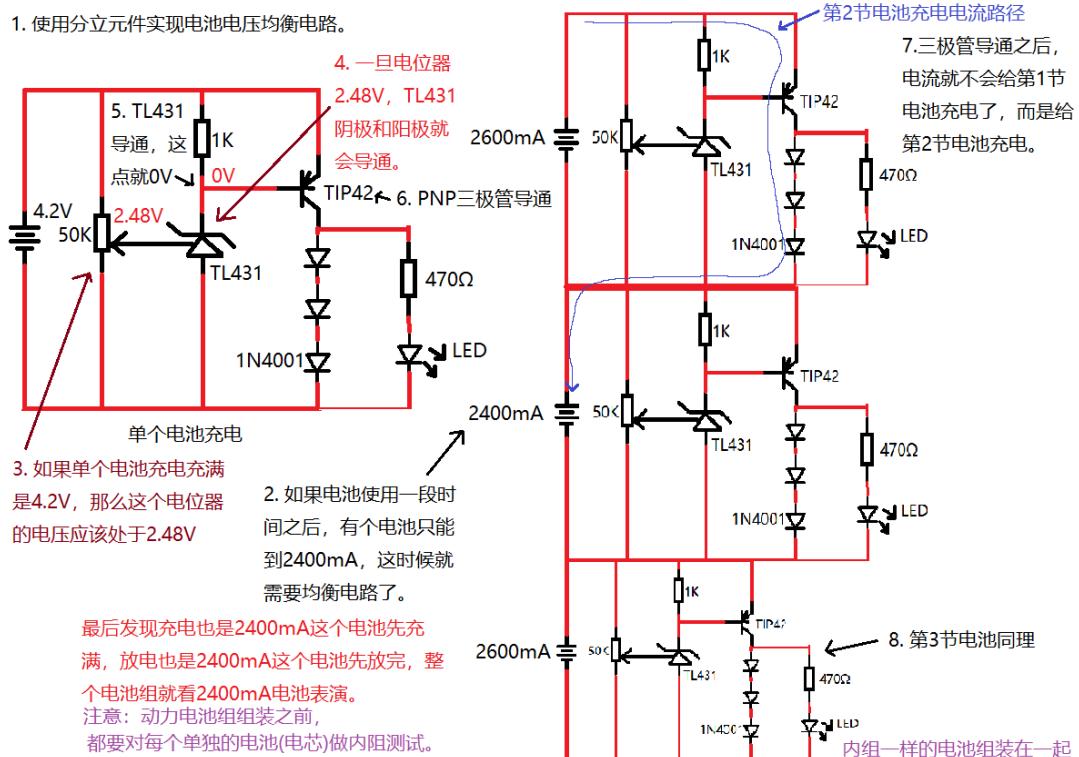
1. 离我们电压均衡值相互偏离，有单个电池电压高，也有单个电池电压低的情况，实现均衡。



# 基于预测电压的均压控制策略研究



## 电池组均流电路实现



## ETA 锂电池主动均衡保护板

1. ETA3000支持3节~24节动力电池组的均衡。

TYPICAL APPLICATION

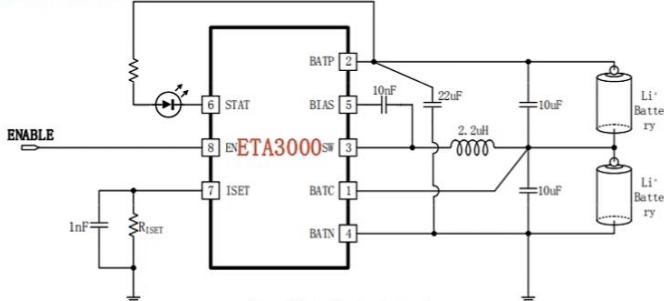
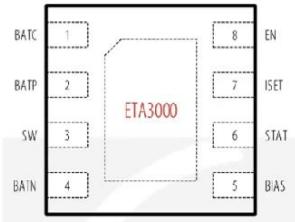
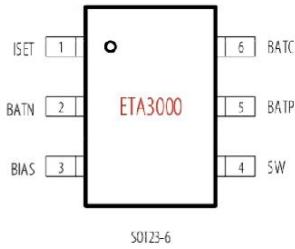
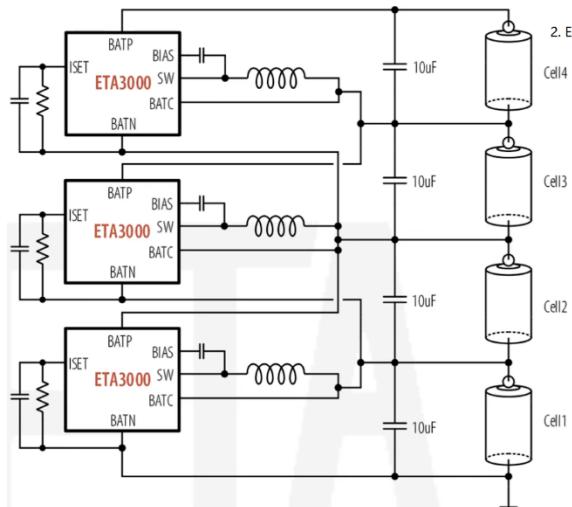


Figure 1: Typical Application Circuit

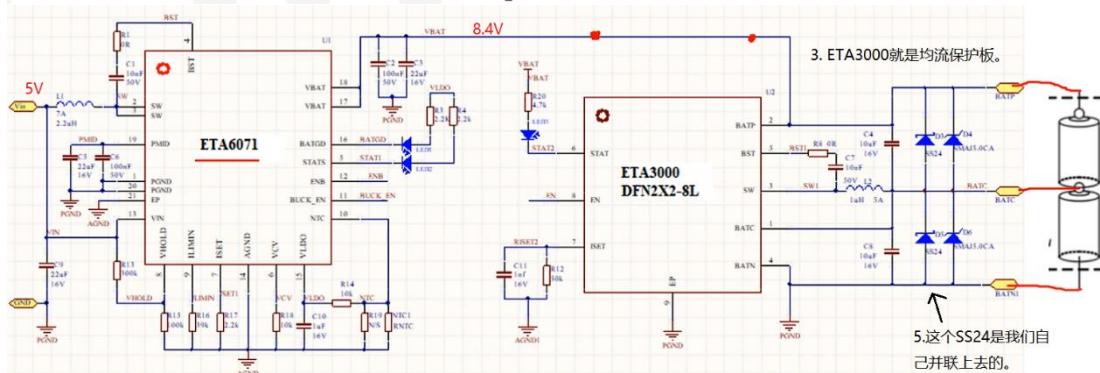


DFN2x2-8



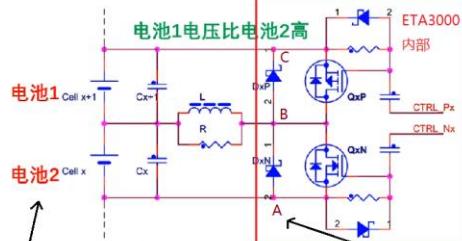
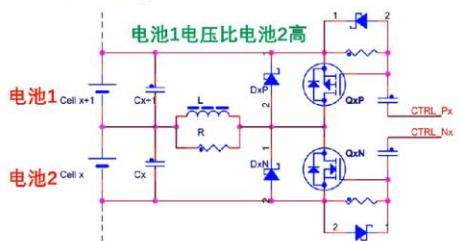
2. ETA3000的数量是等于锂电池数量+1

ETA3000是电池平衡IC，可面向上下两串电池组，其可以通过无限级联，实现3节-24节动力电池组的均衡，ETA3000是主动开关式均衡，其均衡电流可以达到1.5A。ETA3000是钰泰半导体独有专利池内的新型电池均衡器，与传统的无源平衡技术不同，ETA3000利用具有电感器的控制方案来在两个电池之间source和sink电流，直到相邻两节电池电势均等。在传统的线性平衡技术中，会产生较大功耗，而使用ETA3000采用全新的开关式主动均衡技术，其大幅度降低均衡过程中热量的产生，且均衡时间也大大减少。ETA3000在待机M中只消耗电池2uA的工作电流。ETA3000有效地提高了串联电池的性能和寿命。

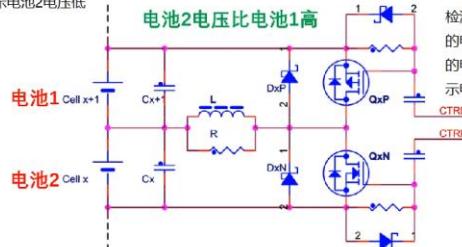
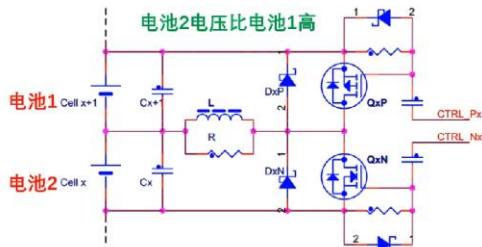


4. ETA6071是一个充电芯片，将5V电压升压到8.4V，给两节锂电池充电。

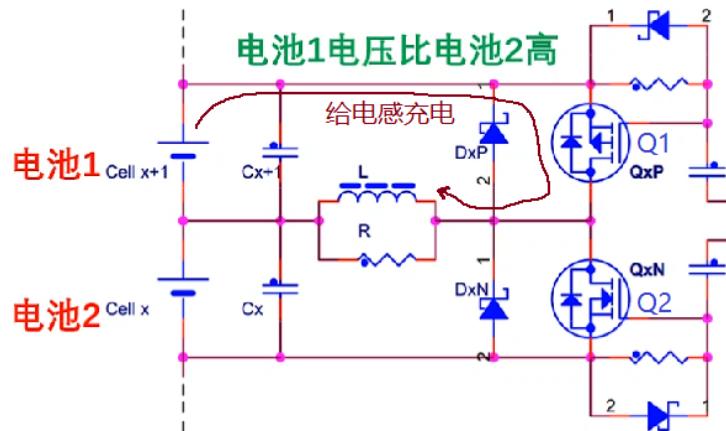
6. ETA3000 内部结构



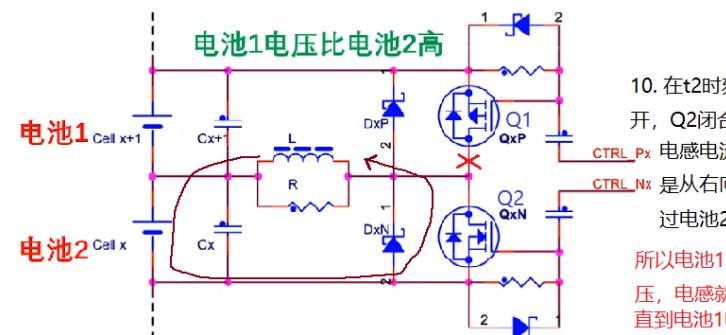
8. 如果2倍的B点电压<C点电压，  
表示电池2电压低



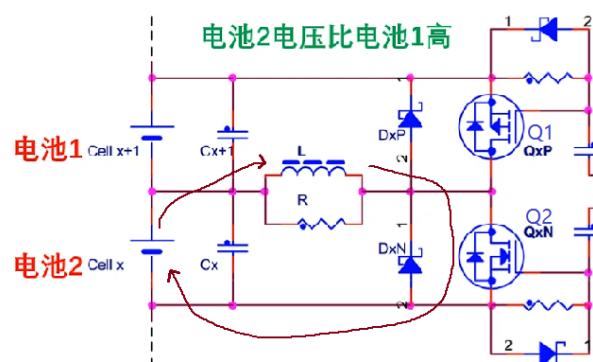
7. ETA3000主要就是  
检测C点的电压和B点  
的电压，如果2倍B点  
的电压>C点电压，表  
示电池2电压高。



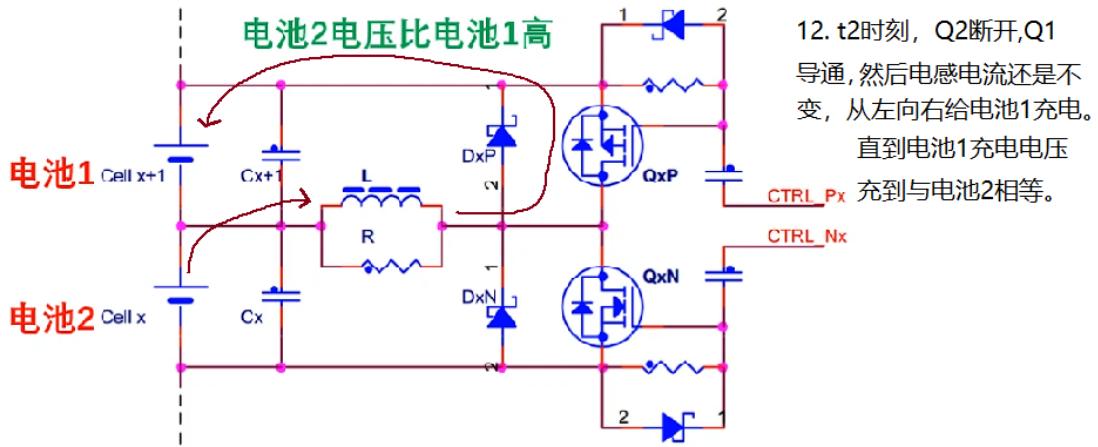
9. 电池1电压>电池2  
电压，Q1导通，Q2关断  
电池1电流经过Q1给  
电感充电。这是t1时刻



10. 在t2时刻，Q1断  
开，Q2闭合，根据电感换路定则  
CTRL Px 电感电流方向还是不变，还  
是从右向左，只是这次是流  
过电池2与Q2形成回路。  
所以电池1电压>电池2电  
压，电感就会这样工作。  
直到电池1电压 = 电池2电压。



11. 如果电池2电压>电池1电  
压，在t1时刻，就会让Q2导  
通，Q1断开，电流从电池2流出，  
然后流入电感，与Q2形成回路。



## 电池保护板电路(带平衡保护功能)

### 三元锂电池

标称电压3.7V  
饱和电压4.2V  
放电截止2.7V

### 磷酸铁锂电池

标称电压3.2V  
饱和电压3.65V  
放电截止2.65V

排名	企业	出货量(吨)	同比	市占率
1	湖南裕能	120000	287.1%	25%
2	德方纳米	91226	203.3%	19%
3	国轩高科	50000	168.8%	10.4%
4	湖北万润	40000	110.5%	8.3%
5	常州锂源	30505	82.4%	6.4%

我们使用比亚迪的BM3451芯片来做锂电池平衡保护板。

型号/项目	过充电检测电压 VDET1	过充电解除电压 VREL1	过放电检测电压 VDET2	过放电解除电压 VREL2	放电过流1检测电压 VOC1	放电过流2检测电压 VOC2	短路检测电压 VSHORT
BM3451HEDC-T28A	3.850V	3.750V	2.000V	2.500V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451SMDC-T28A	4.225V	4.165V	2.750V	3.000V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451TNDC-T28A	4.250V	4.190V	2.800V	3.000V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451TJDC-T28A	4.250V	4.190V	2.500V	2.700V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451VJDC-T28A	4.300V	4.240V	2.500V	2.700V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451HECDC-T20B	3.850V	3.750V	2.000V	2.500V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451SMDC-T20B	4.225V	4.110V	2.750V	3.000V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451TNDC-T20B	4.250V	4.130V	2.800V	3.000V	0.100V	0.400V	0.800V
BM3451TJDC-T20B	4.250V	4.130V	2.500V	2.700V	0.100V	0.400V	0.800V

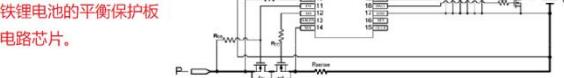


图 6 (a-1) 5单应用(SET接VCC)——带平衡、充放电回路共用

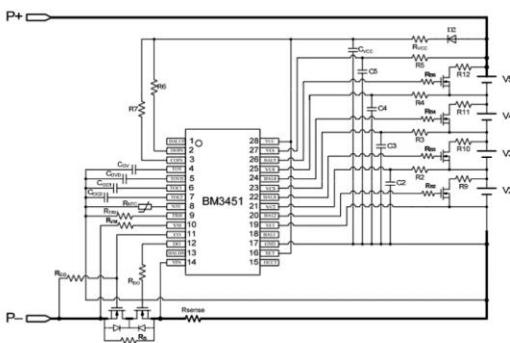


图 6 (b) 4单应用(SET接VCC)——带平衡

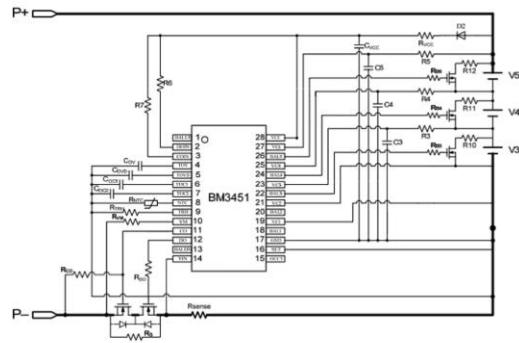
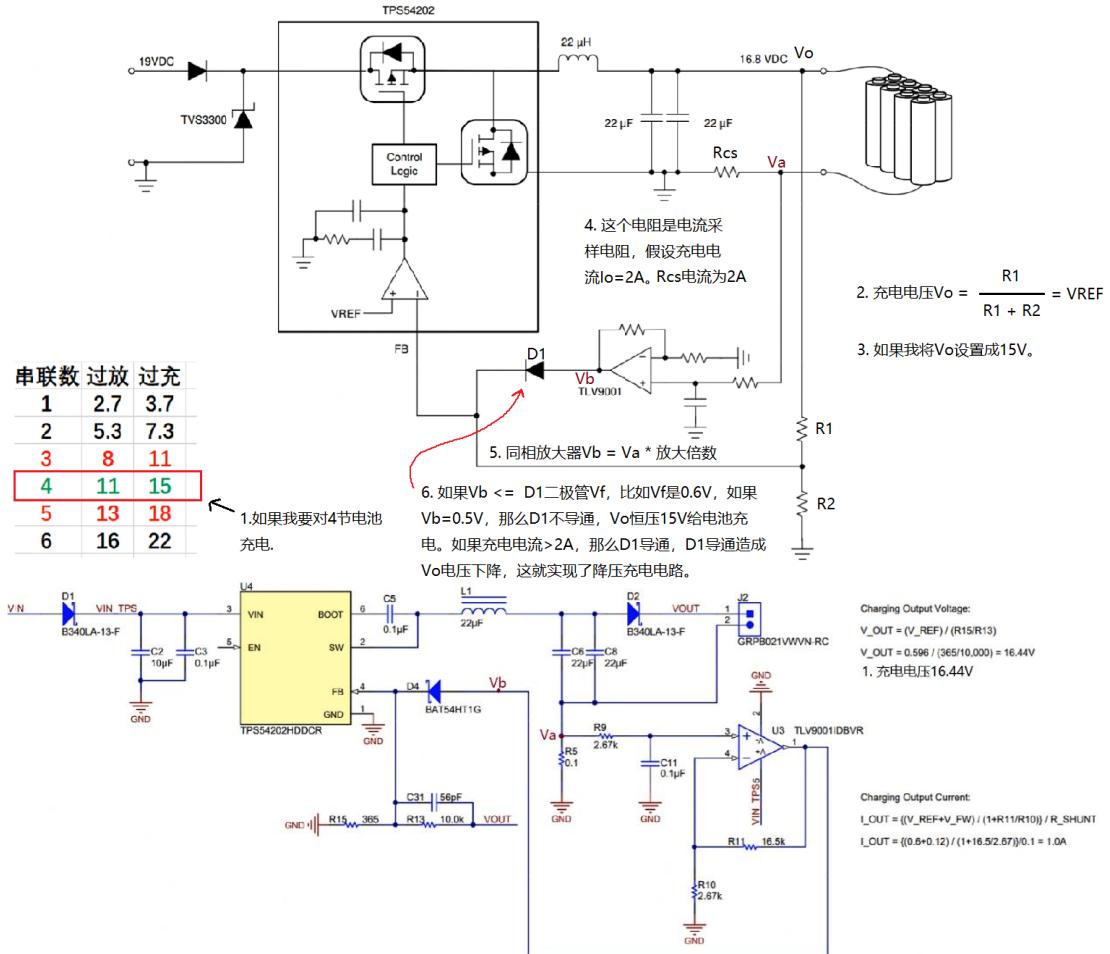


图 6 (c) 3单应用(SET接GND)——带平衡

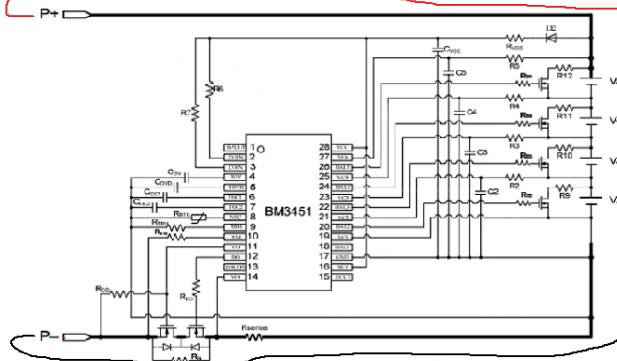
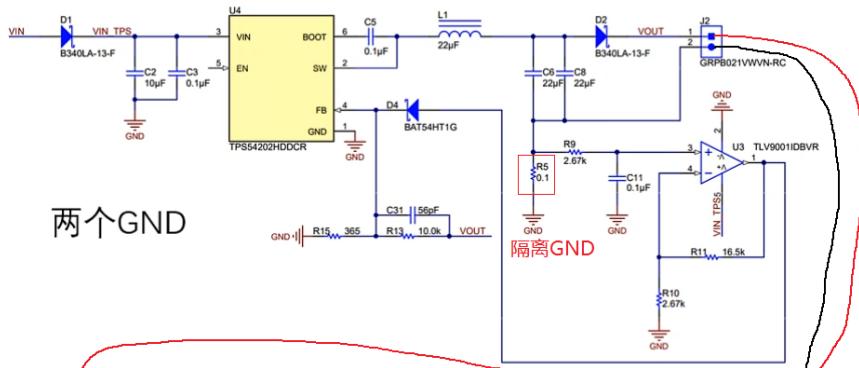
带平衡是什么意思? 比如4节电池串在一起, 如果其中某一节电池的电压比其它3节电池的电压要高, 那么这时候专门给电压高的这节电池放电, 使其与其它3节电池电压相当。所以电池保护板最好是选用这种带有平衡的, 它对电池使用寿命会非常长。

- 平衡功能有三种:
  1. 电阻式 (多节电池, 哪节电池电压高, 就对它进行放电来达到平衡)。
  2. 电感式 (多节电池, 哪节电池电压高, 电压高的电池给电压低的电池充电, 上章说的就是电感式)
  3. 电容式

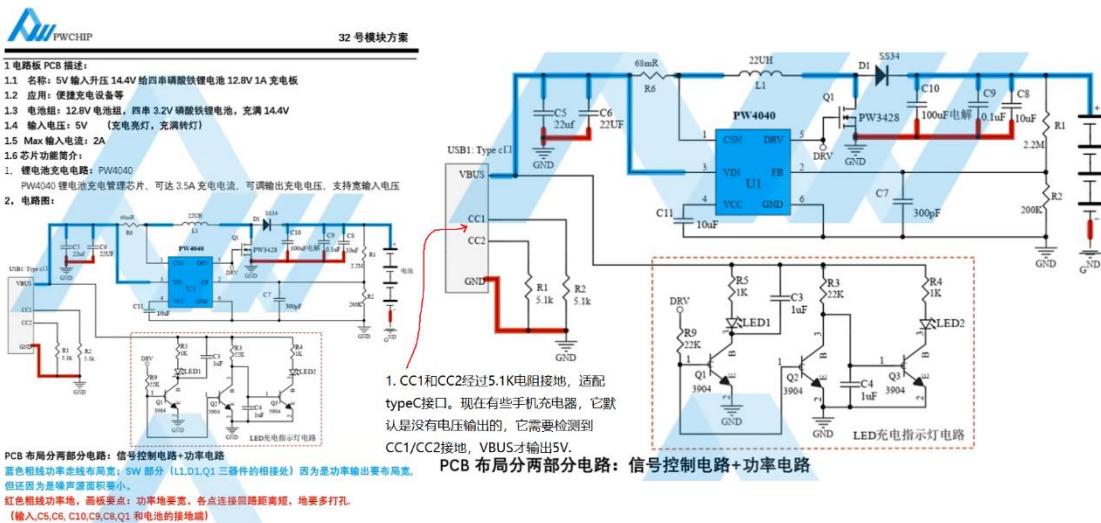
## 磷酸铁锂低成本充电电路



你会发现充电电路和电池保护板电路的地没有连接在一起，中间隔离了一个0.1欧姆采样电阻



## 充电电路方案

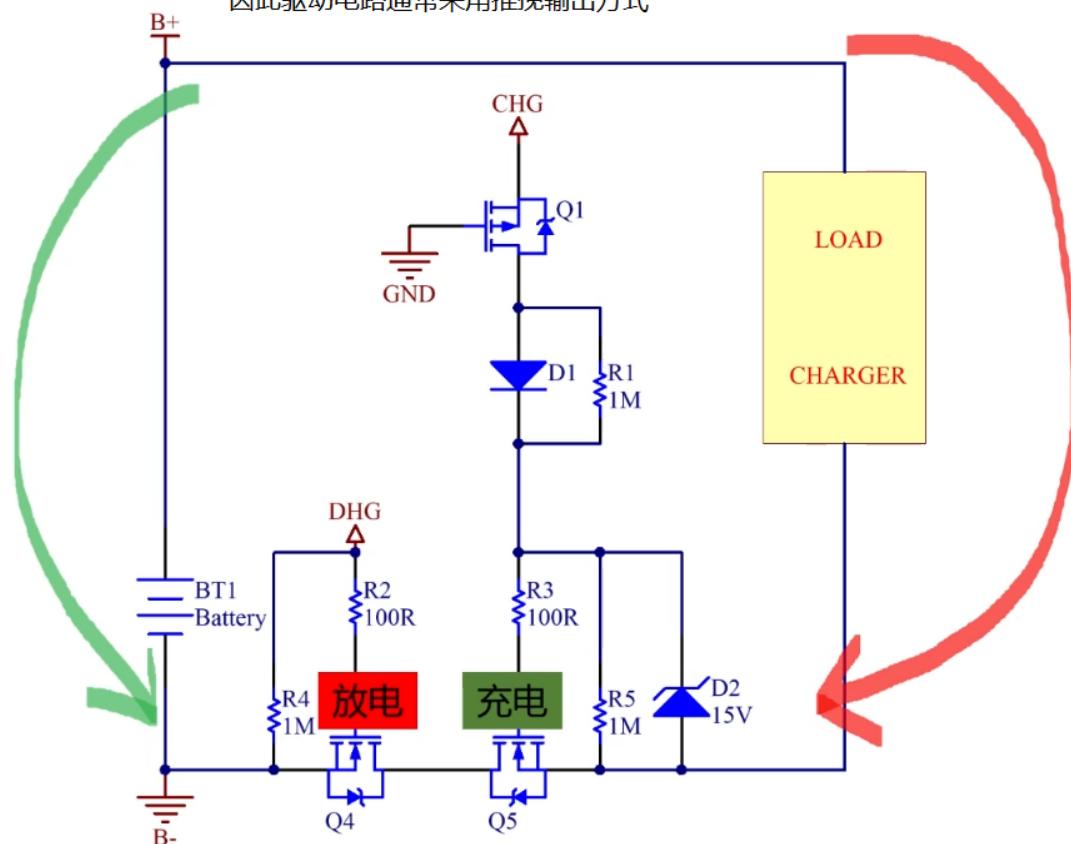


## 充放电电路分离元件设计

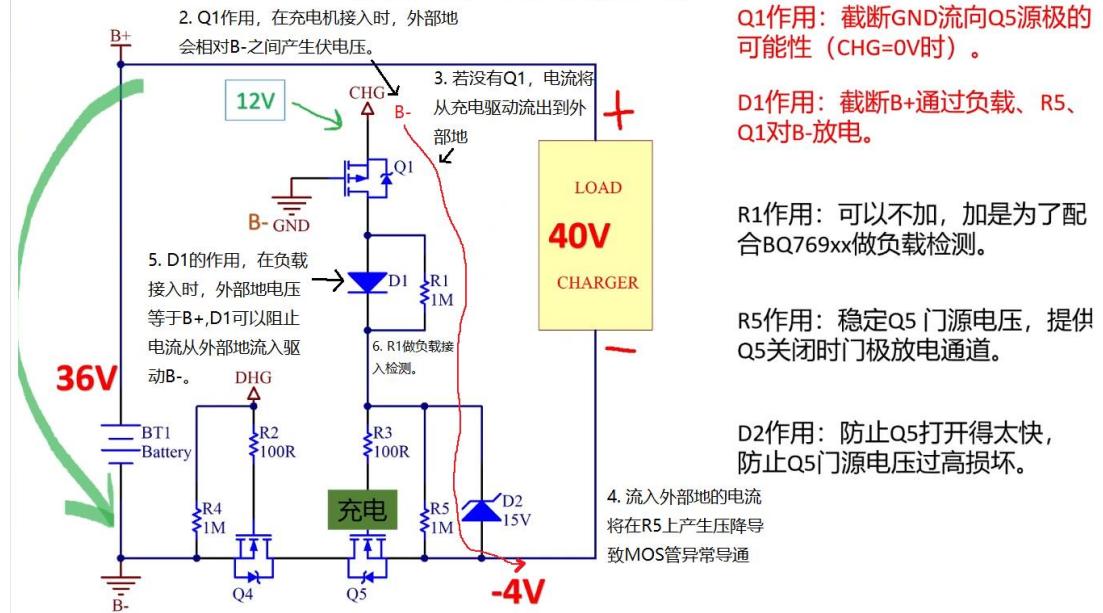
# 充、放电MOSFET电路

1. 注意，电池放电的MOS管需要具备快速关断的能力。

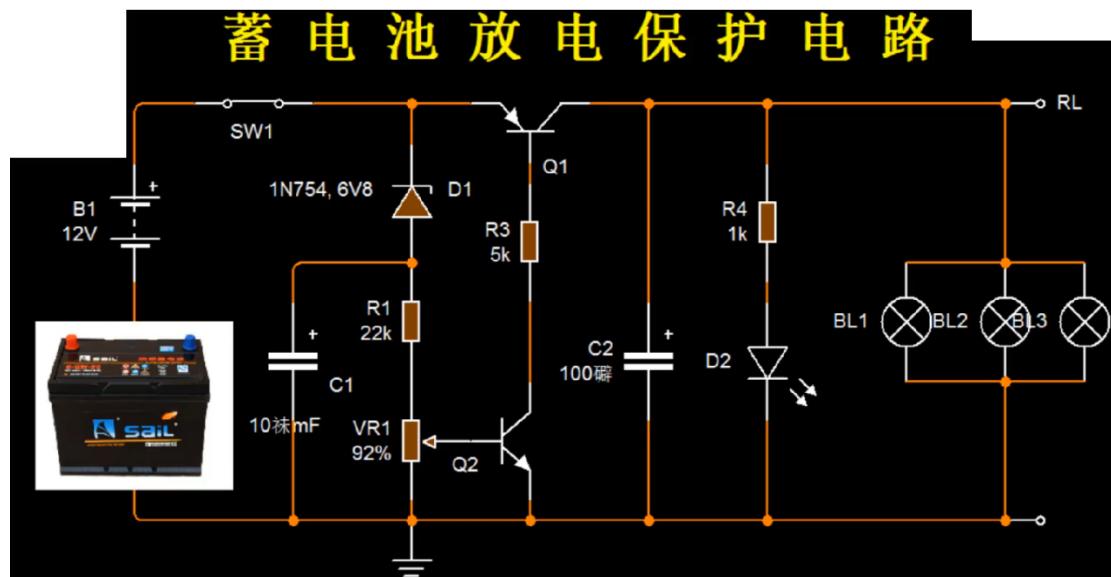
因此驱动电路通常采用推挽输出方式

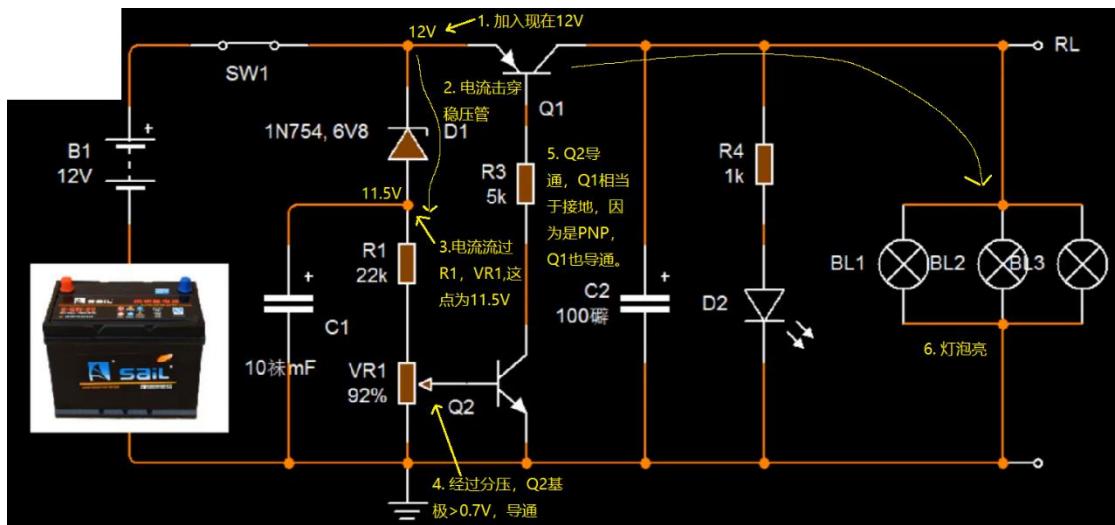


# 充电电路分析

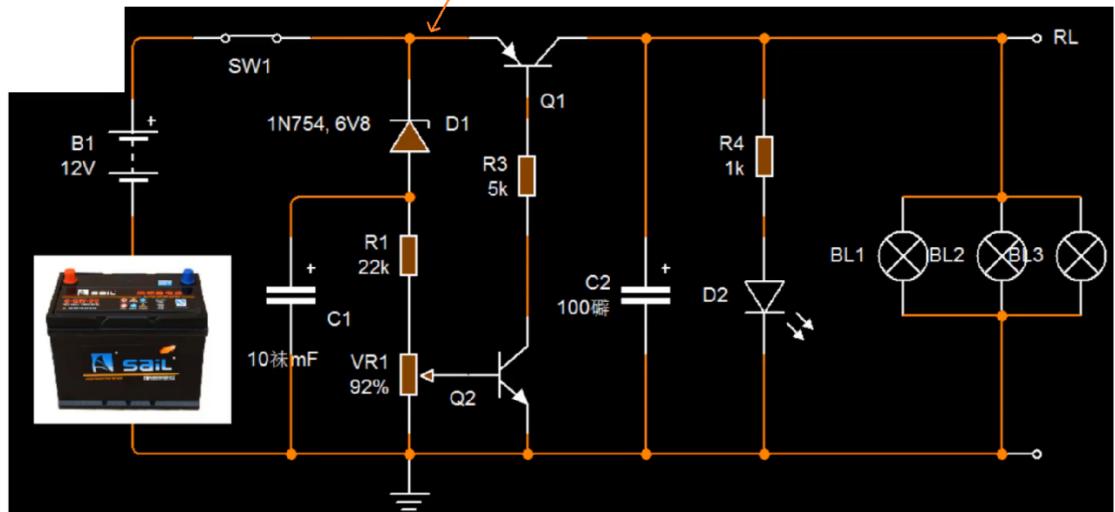


## 蓄电池放电保护电路

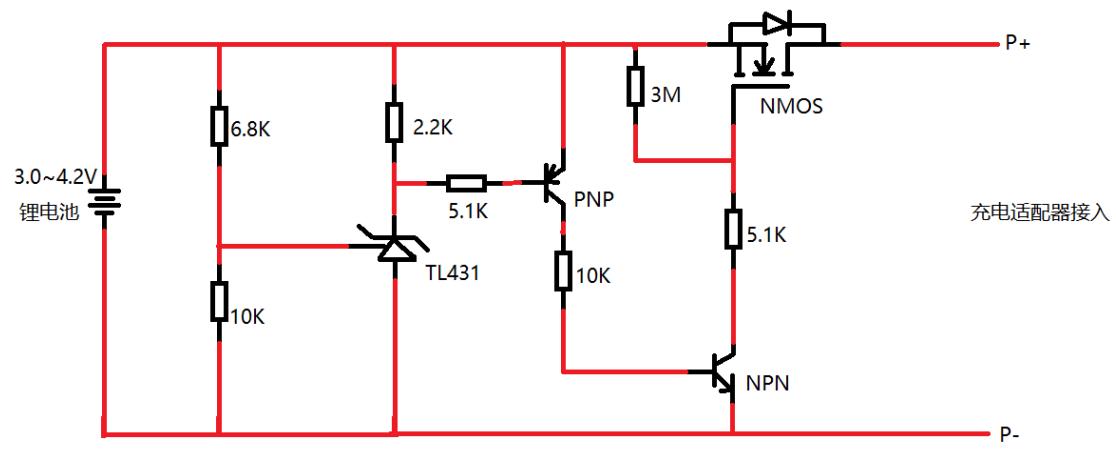




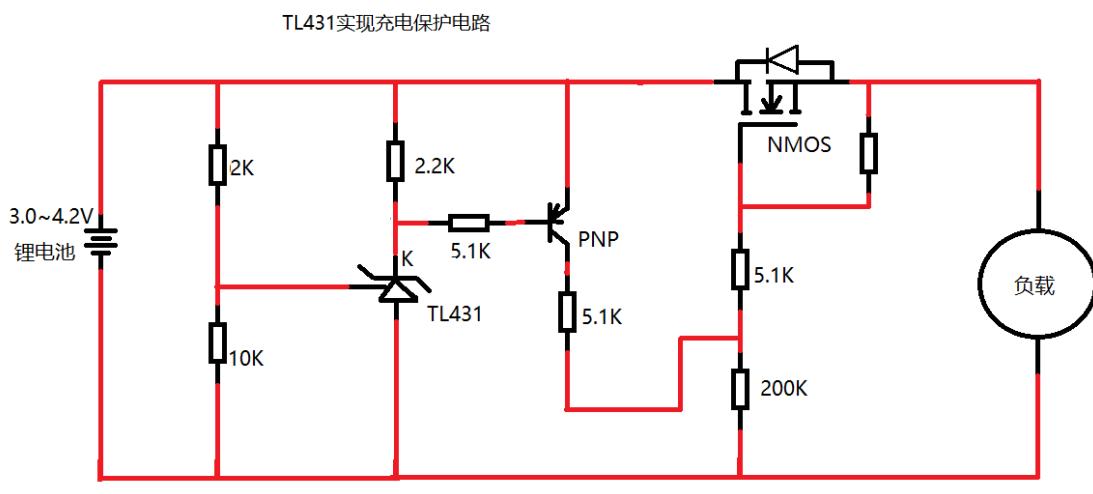
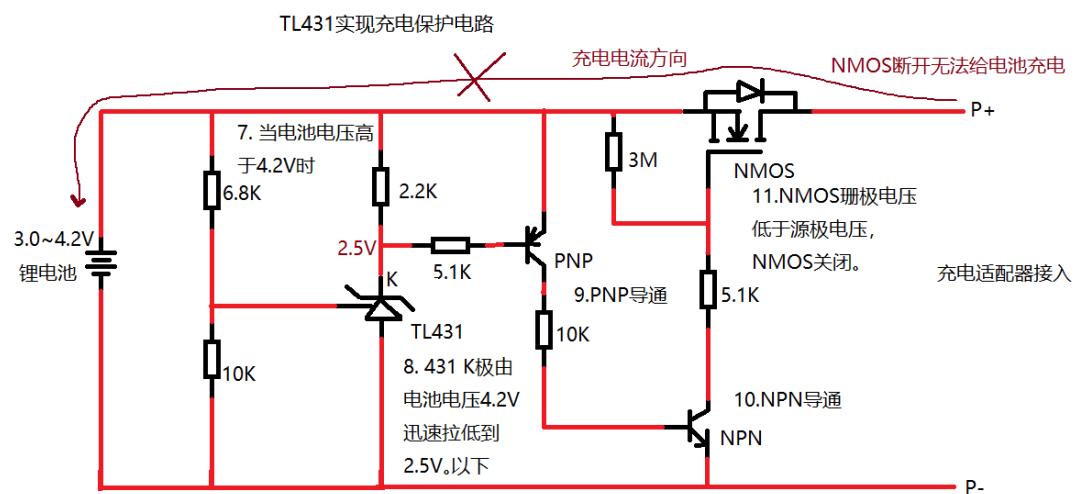
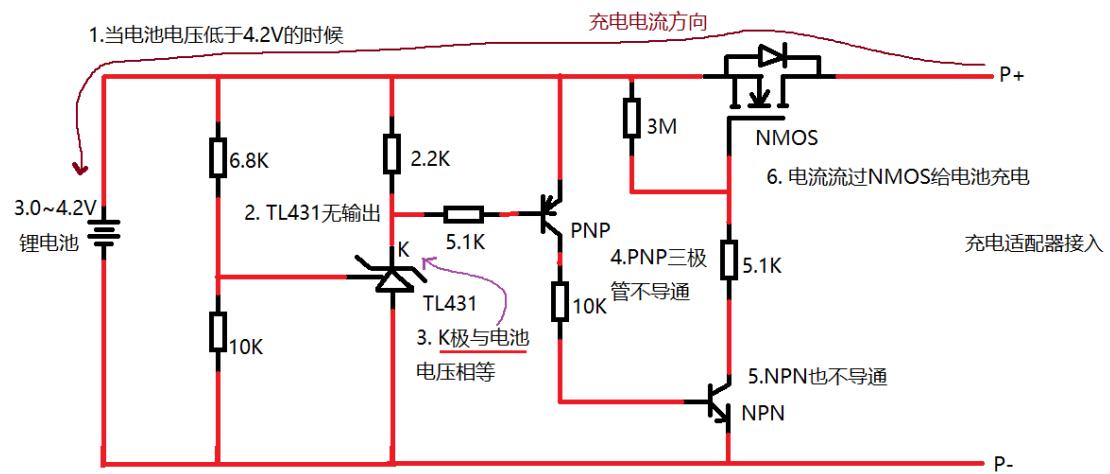
7. 我们知道D1稳压管是6.8V规格的，如果电池是12V，那么通过稳压管的电压是12V， $12V > 6.8V$ ，稳压管导通。  
8. 如果电池B1电压低于6.8V，稳压管D1就不导通，没电流流过R1，那么Q2截止，Q1就关断。



### TL431 锂电池充电保护电路

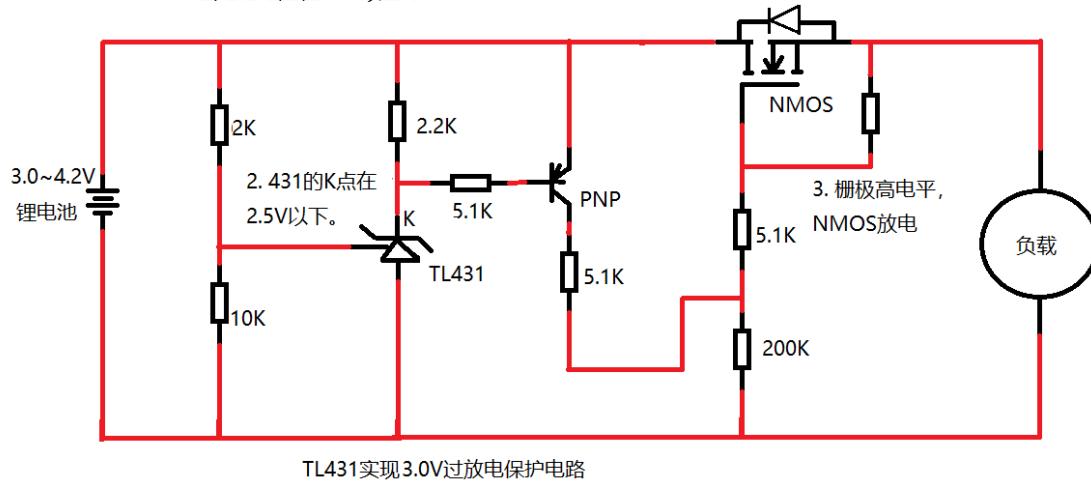


TL431实现充电保护电路



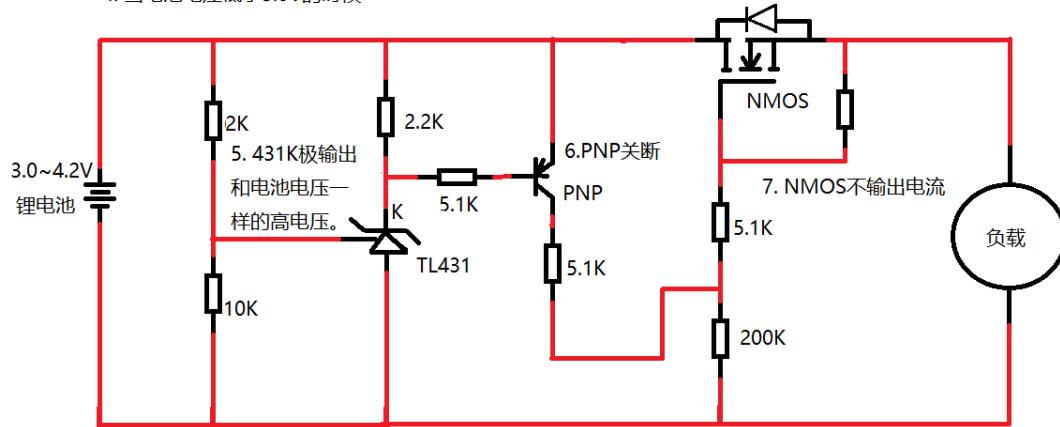
## TL431 锂电池放电保护电路

1. 当电池电压在3.0V以上时



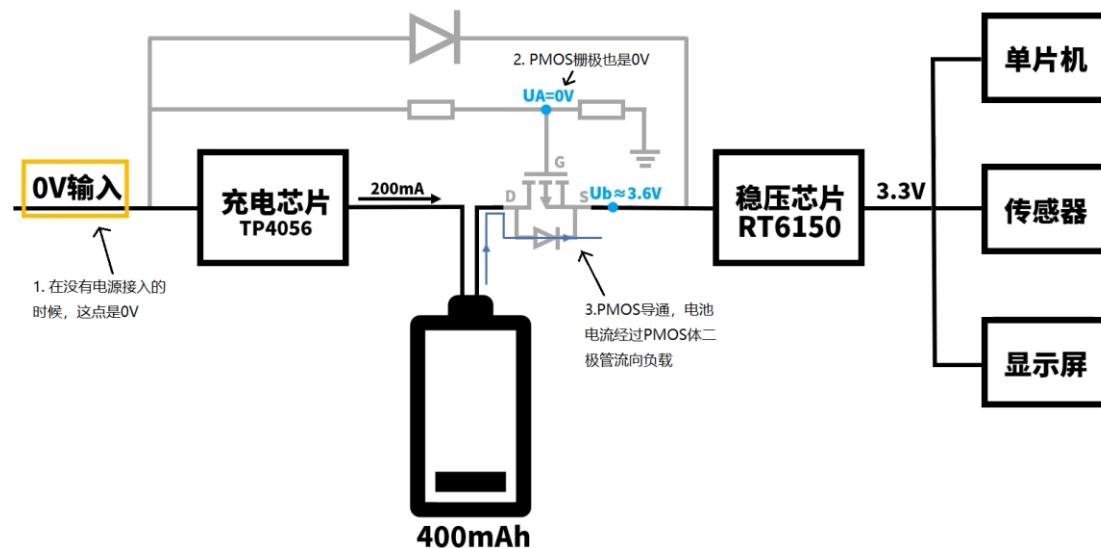
TL431实现3.0V过放电保护电路

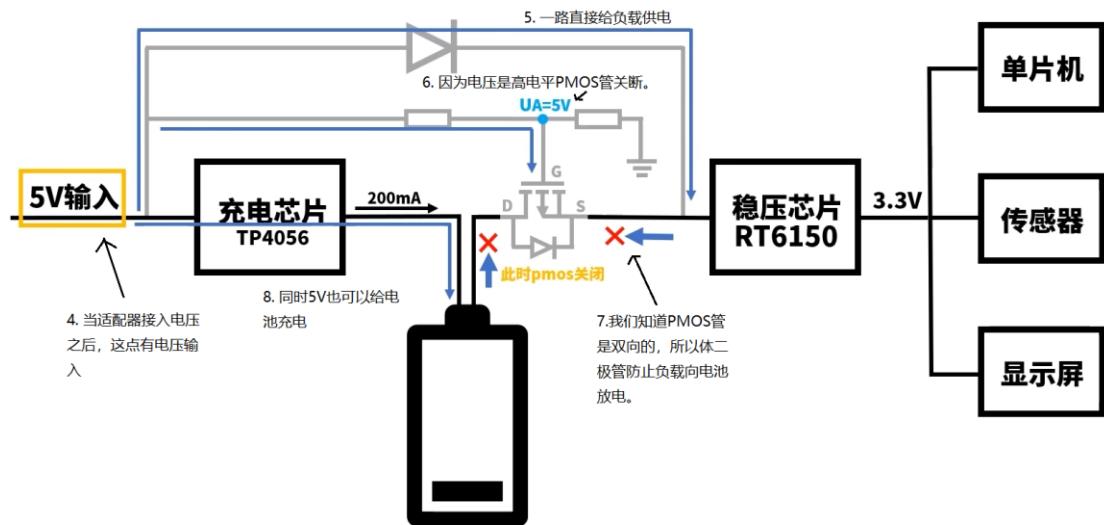
4. 当电池电压低于3.0V的时候



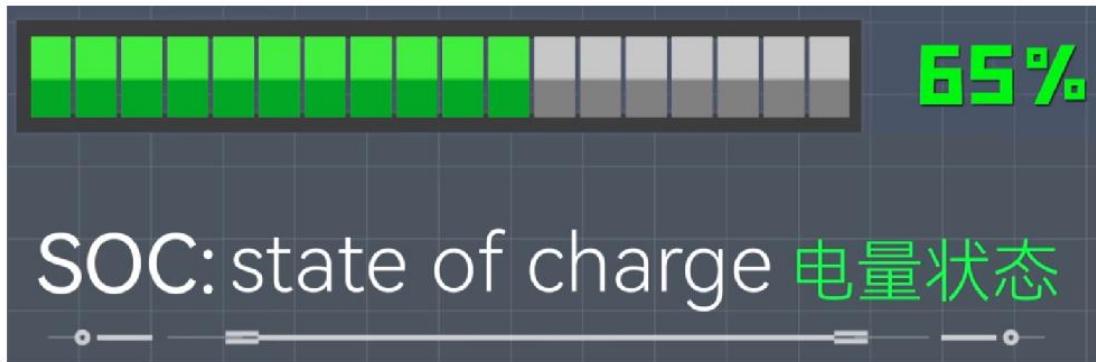
TL431实现3.0V过放电保护电路

## 锂电池边充电边使用电路实现





## 电池 SOC, SOE, SOH 区别



SOC表示电池当前剩余电量。





SOE: 表示剩余能量, 一般用千瓦时来显示。  
也就是经常说的还剩多少度电?

这样说SOC和SOE都能告诉电池还能用多久, 为什么有了SOC还需要SOE呢?

其实在不同的SOC状态下, 相同的电量变化, 会带来不同的能量变化。



SOH: 表示电池健康状态, 也就是当前电池存储能量的能力, 也是衡量电池老化程度的指标。

SOH也可以表示为当前电池如果再次充电, 最多能充多少电。

## 锂电池 SOC 计算方法(安时积分法)

电动汽车行驶时其蓄电池的荷电状态 (State of Charge, 以下简称SOC) 能够表示蓄电池的剩余电量与电池额定容量的比值, 预估汽车的行驶里程, 也用来评价电池的健康状况、确定电池是否过充电或过放电。

SOC一般用百分比表示, 用来描述电池剩余电荷的可用状态, 其值定义为电池剩余容量与额定容量之比, 公式描述如下:

$$SOC = \frac{Q_c}{Q_0} \times 100\%$$

式中:

$Q_c$ ——当前电池剩余电量;

$Q_0$ ——电池额定容量。

安时积分法是估算SOC最基础, 同时也是最常用的方法。假设电池充放电起始状态荷电状态是  $SOC_0$ , 则当前时刻 SOC 的计算公式为:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_0} \int_0^{\tau} \eta I dt$$

式中:

$Q_0$ ——电池的额定容量;

$\tau$ ——充放电时间;

$\eta$ ——充放电效率, 不是常数;

$I$ ——电池充放电电流 (假设电池放电时  $I > 0$ , 电池充电时  $I < 0$ )。

安时积分法是估算SOC的基础, 也是最常用的方法。

根据以上公式可知, 安时积分法除了要得到比较精确的充放电电流外, 还需获得准确的电池SOC初始值。

而利用安时积分法计算电池SOC时, 发现无法定义电池的SOC初始值。

电池长时间静置的情况下，可以认为其开路电压（OCV）与电动势（EMF）数值相等。EMF是SOC的函数，这样就有了OCV和SOC之间的对应关系，可以通过在实验室中进行电池放电实验建立。

所以只有找厂家拿到当前电池的SOC-OCV曲线来做安时积分法。也可以在实验室对电池充放电获得这个曲线。

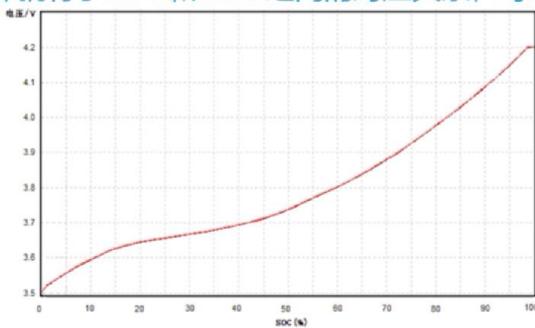


图 SOC-OCV 曲线

安时积分法代码实现如下：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <math.h>

#define CE 2000 //mAh
#define I 100 //mA

int main()
{
    float soc = 0;
    float time = 0;
    float delta_t = 1; //s
    float soc_0 = 50; //%
    while (time <= 3600) //s
    {
        soc = soc_0 + (I * delta_t) / CE;
        soc_0 = soc;
        time += delta_t;
        printf("Time: %.2f s, SOC: %.2f%\n", time, soc);
    }
    return 0;
}
```

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^t i(t) dt}{Q_0}$$

注解：

- CE：锂电池额定容量，单位mAh。
- I：锂电池充放电电流，单位mA。
- soc：锂电池荷电状态（State of Charge），单位%。
- soc\_0：锂电池初始荷电状态。
- delta\_t：时间步长，单位s。
- time：时间，单位s。
- SOC是指电池的电荷状态，通常以百分比的形式表示。BMS 中的SOC算法有很多种，其中一种是安时积分法。安时积分法是一种电池电量计量的基础方法，它采用AH累积的方法，对动态的锂电池进行实时的SOC估算。安时积分法的计算公式如下：

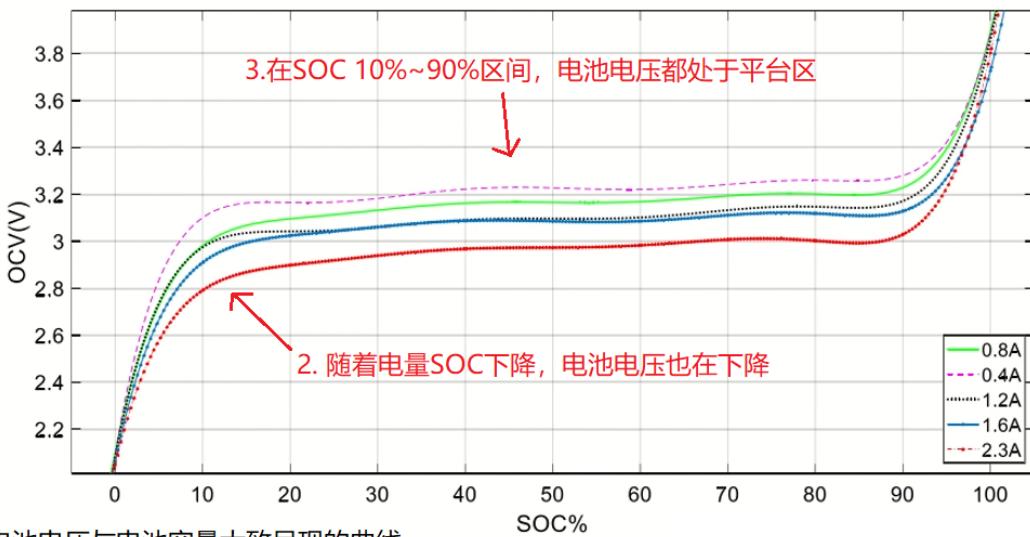
$SOC(t)=SOC_0+Ce\int_0^t i(t) dt$

其中， $SOC_0$  是电池荷电状态的初始电量值； $Ce$  是电池的额定容量； $i(t)$  为电池在  $t$  时刻的充放电电流。12

## 锂电池 SOC 计算方法(安时积分法+开路电压法)实际应用

### 开路电压法

Open circuit voltage state of capacity



1. 电池电压与电池容量大致呈现的曲线

图 2.4 不同放电倍率下 SOC-OCV 曲线

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_0^t \eta I d\tau$$

Cn: 表示电池总的容量, 这个容量要转换成小时, 所以要乘3600秒

其中,  $C_N$ 为电池额定容量;  $I$ 为电池电流;  $\eta$ 为充放电效率

```

1 //1200*3600为1200mAh的电池容量, (stSys.I_Current*1000.0f)为电流mA, 0.001为1MS
2 f32AccumulateCap += 1.0f/(1200.0f)*(stSys.I_Current*1000.0f)*0.001f;
3 stSys.Soc = stSys.Soc_Static - f32AccumulateCap*100.0f;

```

安时积分法通过积分电流随时间的变化来计算电池的总电荷量

1200mA时电池  $\times$  3600秒 = Cn

电池当前时间输出的电流(一般经过采样电阻获得)  $\times$  1000 = 把mA转换成A

$d\tau$ : 0.001为1ms, 也就是1ms消耗的电流

初始静态的SOC值 - 电池电流在时间上的累计

安时积分法代码如下:

```

// 假设的 OCV-SOC 查找表
typedef struct {
    float ocv;          // 开路电压值
    float soc;          // 对应的荷电状态
} OCV_SOC_Entry; //看來需要厂家提供该电池 OCV-SOC 表

// 示例查找表, 实际使用时需要根据实际电池数据填充
OCV_SOC_Entry ocv_soc_lut[] = {
    {3.00f, 0.0f},    // 示例数据, 实际值可能会有所不同
    {3.35f, 5.0f},    //电池电压对应的电池 SOC 值
    {3.48f, 10.0f},
    {3.54f, 20.0f},
    {3.60f, 30.0f},
    {3.64f, 40.0f},
    {3.68f, 50.0f},
    {3.72f, 60.0f},
    {3.75f, 70.0f},
    {3.80f, 80.0f},
    {3.96f, 90.0f},
    {4.20f, 100.0f},
};

// 查找表大小
#define LUT_SIZE (sizeof(ocv_soc_lut) / sizeof(OCV_SOC_Entry))
// 通过 OCV 估算 SOC 的函数
float estimate_soc_from_ocv(float measured_ocv)
{
    for (int i = 0; i < LUT_SIZE - 1; i++) {
        if (measured_ocv >= ocv_soc_lut[i].ocv && measured_ocv < ocv_soc_lut[i + 1].ocv) {
            // 线性插值计算 SOC
            float slope = (ocv_soc_lut[i + 1].soc - ocv_soc_lut[i].soc) / (ocv_soc_lut[i + 1].ocv - ocv_soc_lut[i].ocv);
            float soc = ocv_soc_lut[i].soc + slope * (measured_ocv - ocv_soc_lut[i].ocv);
            return soc;
        }
    }
    // 如果超出查找表范围, 返回错误值或进行其他处理
    return -1.0f; // 示例错误值
}

```

OCV 估算 SOC 函数应用如下

<pre> // stSys.f32I_Cur = (float)stAdc.u16Value[0]/4095.0*3.3*2*1.0/(24.0*0.05); // (float)stAdc.u16Value[0]/4095.0*3.3*2为放大器输出端电压 stSys.I_Current = (float)stAdc.u16Value[0]/4095.0f*3.3f/0.6f; //采样的电池电压 stSys.V_Battery = (float)stAdc.u16Value[1]/4095.0f*3.3f*2.0f; //采样的电池电流 stSys.P_System = stSys.I_Current * stSys.V_Battery;  f32_Tmp = fabs(stSys.P_System - stSys.P_Static); if (f32_Tmp &lt; 0.1f) {     //如果当前系统功耗-系统静态功耗差值小于0.1W，且连续500MS，更新系统静态功耗，更新静态SOC和当前SOC的值/     u16PowerStaticCnt++;     if (u16PowerStaticCnt &gt; 500) {         u16PowerStaticCnt = 0;         stSys.P_Static = stSys.P_System;         stSys.Soc = stSys.Soc_Static = estimate_soc_from_ocv(stSys.V_Battery);     }     stSys.P_Motor = 0.0f;     f32AccumulateCap = 0; } else {     stSys.P_Motor = f32_Tmp;     f32AccumulateCap += 1.0f/(1200.0f*3600.0f)*(stSys.I_Current*1000.0f)*0.001f;     f32AccumulateCap += (float)(2.3148e-7)*stSys.I_Current;     stSys.Soc = stSys.Soc_Static - f32AccumulateCap*100.0f; } //1200*3600为1200mAh的电池容量，(stSys.I_Current*1000.0f)为毫安，0.001f为1MS f32AccumulateCap += 1.0f/(1200.0f*3600.0f)*(stSys.I_Current*1000.0f)*0.001f; 得到2.3148.... </pre>	<p>1. 电机未开机，电池参数如下：</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>V_Battery</td><td>3.80849838</td><td>电池电压</td></tr> <tr><td>I_Current</td><td>0.175944628</td><td>电池输出电流</td></tr> <tr><td>P_System</td><td>0.670091152</td><td></td></tr> <tr><td>P_Static</td><td>0.675206304</td><td></td></tr> <tr><td>P_Motor</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>Soc_Static</td><td>80.5311508</td><td>电机未启动，静态SOC</td></tr> <tr><td>Soc</td><td>80.5311508</td><td>总SOC</td></tr> </tbody> </table> <p>现在基本处于空载状态，只有极小部分电流在流动。</p> <p>2. 电机转动起来，电池参数如下：</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>V_Battery</td><td>3.64893794</td><td>电机转动，电池电压下降</td></tr> <tr><td>I_Current</td><td>0.615140378</td><td>电池输出电流增大</td></tr> <tr><td>P_System</td><td>2.24460912</td><td></td></tr> <tr><td>P_Static</td><td>0.670091152</td><td></td></tr> <tr><td>P_Motor</td><td>1.57451797</td><td>空载时SOC不变</td></tr> <tr><td>Soc_Static</td><td>80.5311508</td><td>电机转动消耗的当前SOC改变</td></tr> <tr><td>Soc</td><td>80.3452072</td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>这个实验说明了，SOC初始值就算空载时候的值。</p> <p>3. 电机停止</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>runTime</td><td>0</td><td>uint</td></tr> <tr><td>V_Battery</td><td>3.79882789</td><td>float</td></tr> <tr><td>I_Current</td><td>0.177289382</td><td>float</td></tr> <tr><td>P_System</td><td>0.673491836</td><td>float</td></tr> <tr><td>P_Static</td><td>0.673206091</td><td>float</td></tr> <tr><td>P_Motor</td><td>0</td><td>float</td></tr> <tr><td>Soc_Static</td><td>79.4432449</td><td>float</td></tr> <tr><td>Soc</td><td>79.4432449</td><td>float</td></tr> </tbody> </table> <p>电机停止后，初始SOC变成了之前电机转动消耗的SOC</p>	V_Battery	3.80849838	电池电压	I_Current	0.175944628	电池输出电流	P_System	0.670091152		P_Static	0.675206304		P_Motor	0		Soc_Static	80.5311508	电机未启动，静态SOC	Soc	80.5311508	总SOC	V_Battery	3.64893794	电机转动，电池电压下降	I_Current	0.615140378	电池输出电流增大	P_System	2.24460912		P_Static	0.670091152		P_Motor	1.57451797	空载时SOC不变	Soc_Static	80.5311508	电机转动消耗的当前SOC改变	Soc	80.3452072		runTime	0	uint	V_Battery	3.79882789	float	I_Current	0.177289382	float	P_System	0.673491836	float	P_Static	0.673206091	float	P_Motor	0	float	Soc_Static	79.4432449	float	Soc	79.4432449	float
V_Battery	3.80849838	电池电压																																																																	
I_Current	0.175944628	电池输出电流																																																																	
P_System	0.670091152																																																																		
P_Static	0.675206304																																																																		
P_Motor	0																																																																		
Soc_Static	80.5311508	电机未启动，静态SOC																																																																	
Soc	80.5311508	总SOC																																																																	
V_Battery	3.64893794	电机转动，电池电压下降																																																																	
I_Current	0.615140378	电池输出电流增大																																																																	
P_System	2.24460912																																																																		
P_Static	0.670091152																																																																		
P_Motor	1.57451797	空载时SOC不变																																																																	
Soc_Static	80.5311508	电机转动消耗的当前SOC改变																																																																	
Soc	80.3452072																																																																		
runTime	0	uint																																																																	
V_Battery	3.79882789	float																																																																	
I_Current	0.177289382	float																																																																	
P_System	0.673491836	float																																																																	
P_Static	0.673206091	float																																																																	
P_Motor	0	float																																																																	
Soc_Static	79.4432449	float																																																																	
Soc	79.4432449	float																																																																	

以下为德州仪器的一款**电池监测和平衡IC**，具有ADC低通滤波、平衡散热管理等功能。



BQ79616

SLUSF21 – JUNE 2023

## BQ79616 16-Series Battery Monitor, Balancer, and Integrated Hardware Protector

### 1 Features

- ±1.5-mV ADC accuracy
- Built-in redundancy path for voltage and temperature diagnostics
- Highly accurate cell voltage measurements within 128 µs for all cell channels



### 3 Description

The BQ79616 device provides high-accuracy cell voltage measurements in less than 200 µs for 16-series battery modules in high-voltage battery management systems in HEV/EV. The monitor offers different channel options in the same package type,

BQ76920, BQ76930, BQ76940

ZHCSCE2I – OCTOBER 2013 – REVISED MARCH 2022

## 用于锂离子电池和磷酸盐电池的 BQ769x0 3 节至 15 节串联、电池监控器系列

### 1 特性

- AFE 监控特性
  - 纯数字接口
  - 内部模数转换器 (ADC) 用于测量电池电压、芯片温度和外部热敏电阻

### 3 说明

BQ769x0 可靠的模拟前端 (AFE) 器件系列是针对下一代高功率系统（如轻型电动汽车、电动工具和不间断电源）的完整电池组监控与保护解决方案的组成部分。BQ769x0 专为实现低功耗而设计：不仅可通过启用/禁

## 锂电池 SOC 计算方法(无迹卡尔曼滤波法)

1. 无迹卡尔曼滤波是传统卡尔曼滤波算法改进方法的一种。
2. 无迹卡尔曼滤波的核心是采用无迹变换UT的方式。

核心思想:

将一个状态估计点转换为多个估计点

然后取这多个采样估计点的平均值，进行后续的卡尔曼滤波，递推。

这可以使得非线性变换后的均值和协方差的精度更高，最终得到相对比较理想的状态值。

3. 因为传统的卡尔曼滤波算法是单点递推，无迹UT卡尔曼滤波是多点递推，所以UT精度更高。

4. 传统卡尔曼滤波方式如下：

卡尔曼滤波算法的基本步骤是以“预测—实际测量—校正”的顺序向后进行递推运算，利用系统的测量值作为反馈来消除夹杂的随机干扰，其状态方程以及观测方程可以表示为：

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A_k x_k + B_k u_k + w_k \\y_k &= C_k x_k + D_k u_k + v_k\end{aligned}$$

$x_k$  代表 k 时刻的系统状态向量值

我们一般把  $x_k$  表现成三维状态向量 [ SOC U1 U2 ]  
电量 电压1 电压2  
 $x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k$  状态方程

$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k$  测量方程

$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k$  uk 代表 k 时刻的系统输入值  
用到电池模型 uk 就是电流 i 作为输入  
 $y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k$  随机噪声用 wk 过程噪声用 vk  
随机噪声 wk 跟过程噪声 vk 一般取很小的随机数值来替代  
yk 就是工作电压

式中的 ABCD 可以通过基尔霍夫定律来表示

$A_k$  通常是一个  $3 \times 3$  矩阵  $\begin{pmatrix} x & x & x \\ x & x & x \\ x & x & x \end{pmatrix}$        $B_k$  通常是一个  $1 \times 3$  的矩阵  $\begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix}$

$C_k$  通常是  $[ 1 \ 1 \ d \frac{\text{OCV}}{\text{SOC}} ]$   
求导

输出值  $y_k$  由系统观测方程得到。由上述方程明显看出，

线性系统的输出是系统状态、系统输入以及某些随机噪声的线性组合。

随机干扰  $v_k$  用于描述一些由于传感器噪声引起的观测误差，这些噪声并不直接影响系统的状态。状态空间表达式中， $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$ ,  $D_k$  完全描述整个系统，而且可能是实时变化的。给定系统的状态空间表达式以及系统所测得的输入  $u_k$ 、输出  $y_k$ ，可以根据卡尔曼滤波算法在动态条件下实时地估计系统的内部状态。

## 无迹卡尔曼滤波电池电量 SOC 检测 C 语言实现

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define N 6           // 状态量维度
#define M 2           // 测量值维度
#define alpha 0.001    // 过程噪声标准差
#define beta 2         // 测量噪声标准差
#define lambda (alpha*alpha*(N+beta*beta)) // UKF参数
#define k 0.5          // Peukert常数
#define Q 3600         // 电池容量, 单位: C

typedef struct {
    double x[N];           // 状态量
    double P[N][N];        // 状态协方差矩阵
    double R[M][M];        // 测量协方差矩阵
    double K[N][M];        // 卡尔曼增益
    double y[M];           // 测量偏差
    double S[M][M];        // 测量协方差矩阵
    double X[N][2*N+1];    // UKF sigma点
    double Y[M][2*N+1];    // 测量值sigma点
    double mean_x[N];      // sigma点均值
    double mean_y[M];      // 测量值sigma点均值
    double Pxy[N][M];      // 状态与测量协方差矩阵
} kalman;

// 状态方程
void f(double x[N], double u, double dt) {
    x[0] += dt * (1 - k * pow(fabs(u), 1.357)) * u / Q;
}

// 测量方程
void h(double x[N], double y[M]) {
    y[0] = x[0];
    y[1] = x[1];
}

// 计算UKF sigma点
void compute_sigma_points(kalman *kf) {
    int i, j;
    double d;
    double sqrt_n_lambda = sqrt(N + lambda);

    // 计算sigma点
    for (i = 0; i < N; i++) {
        kf->X[i][0] = kf->x[i];
        kf->Y[0][0] = kf->x[0];
        kf->Y[1][0] = kf->x[1];
        for (j = 1; j <= N; j++) {
            d = sqrt_n_lambda * sqrt(kf->P[i][i]);
            kf->X[i][j] = kf->x[i] + d;
            kf->X[i][j+N] = kf->x[i] - d;
        }
    }
}
```

```

// 计算UKF sigma点均值
void compute_mean(kalman *kf) {
    int i, j;

    for (i = 0; i < N; i++) {
        kf->mean_x[i] = 0;
        for (j = 0; j < 2*N+1; j++) {
            kf->mean_x[i] += kf->X[i][j] / (2*N+1);
        }
    }

    for (i = 0; i < M; i++) {
        kf->mean_y[i] = 0;
        for (j = 0; j < 2*N+1; j++) {
            kf->mean_y[i] += kf->Y[i][j] / (2*N+1);
        }
    }
}

// 计算UKF sigma点方差
void compute_covariance(kalman *kf) {
    int i, j, k;

    for (i = 0; i < N; i++) {
        for (j = 0; j < N; j++) {
            kf->P[i][j] = 0;
            for (k = 0; k < 2*N+1; k++) {
                kf->P[i][j] += (kf->X[i][k] - kf->mean_x[i]) * (kf->X[j][k] - kf->mean_x[j]) / (2*N+1);
            }
        }
    }
}

// 计算卡尔曼增益
void compute_kalman_gain(kalman *kf) {
    int i, j;

    for (i = 0; i < N; i++) {
        for (j = 0; j < M; j++) {
            kf->Px[i][j] = 0;
            kf->K[i][j] = 0;
            for (int k = 0; k < 2*N+1; k++) {
                kf->Px[i][j] += (kf->X[i][k] - kf->mean_x[i]) * (kf->Y[j][k] - kf->mean_y[j]) / (2*N+1);
                kf->K[i][j] += kf->Px[i][j] / (kf->S[j][j] + beta*beta);
            }
        }
    }
}

// 更新状态量
void update_state(kalman *kf) {
    int i, j;

    // 更新状态量
    for (i = 0; i < N; i++) {
        kf->x[i] = kf->mean_x[i];
        for (j = 0; j < M; j++) {
            kf->x[i] += kf->K[i][j] * kf->y[j];
        }
    }

    // 更新状态协方差矩阵
    for (i = 0; i < N; i++) {
        for (j = 0; j < N; j++) {
            kf->P[i][j] -= kf->K[i][0] * kf->S[0][0] * kf->K[j][0];
            kf->P[i][j] -= kf->K[i][1] * kf->S[1][1] * kf->K[j][1];
        }
    }
}

```

```

// 电池SOC计算[函数] (https://geek.csdn.net/edu/column/ba94496e6cfa8630df5d047358ad9719?dp_token=eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJh
double battery_soc(double voltage, double current, kalman *kf, double dt) {
    double u = voltage - Q * current / 3600;
    double soc;

    // UKF 预测状态量
    compute_sigma_points(kf);
    for (int i = 0; i < 2*N+1; i++) {
        f(kf->X[0], u, dt);
    }
    compute_mean(kf);
    compute_covariance(kf);

    // UKF 预测测量值
    compute_sigma_points(kf);
    for (int i = 0; i < 2*N+1; i++) {
        h(kf->X, kf->Y[0]);
        kf->Y[1][i] = kf->Y[0][1];
    }
    compute_mean(kf);
    compute_covariance(kf);

    // 计算卡尔曼增益
    kf->S[0][0] = kf->R[0][0] + beta*beta;
    kf->S[1][1] = kf->R[1][1] + beta*beta;
    kf->S[0][1] = kf->R[0][1];
    kf->S[1][0] = kf->R[1][0];
    compute_kalman_gain(kf);

    // 更新状态量与状态协方差矩阵
    kf->y[0] = voltage;
    kf->y[1] = current;
    update_state(kf);

    // 计算电池SOC值
    soc = kf->x[0] * Q;
    if (soc < 0) soc = 0;
    if (soc > Q) soc = Q;

    return soc;
}

int main() {
    double voltage, current, soc;
    kalman kf = {0};

    // 初始化状态量与状态协方差矩阵
    kf.x[0] = 1; // SOC初始值
    kf.P[0][0] = 0.01; // SOC初始方差
    kf.P[1][1] = 0.01; // 电流初始方差
    kf.R[0][0] = 0.01; // 电池电压测量噪声方差
    kf.R[1][1] = 0.01; // 电池电流测量噪声方差

    while (1) {
        // 获取电池电压与电流
        voltage = get_voltage();
        current = get_current();

        // 计算电池SOC值
        soc = battery_soc(voltage, current, &kf, 1);

        // 输出电池SOC值
        printf("Battery SOC: %.2lf%%\n", soc / Q * 100);
    }

    return 0;
}

```

在上述代码中，我们使用了无迹卡尔曼滤波（UKF）算法来实现电池SOC的计算。UKF是一种基于sigma点的卡尔曼滤波算法，相比传统的卡尔曼滤波算法，UKF更适合非线性系统的估计问题。在电池SOC计算中，我们使用UKF来估计电池的状态量（即电池的SOC值），同时也使用UKF来预测电池的测量值（即电池的电压和电流值）。最后，我们使用卡尔曼滤波算法来对估计值进行修正，得到最终的电池SOC值。

在实际使用中，我们需要根据电池的具体参数来选择合适的Peukert常数 $\alpha$ 和电池容量 $Q$ 。同时，我们也需要根据实际情况来调整过程噪声标准差 $\alpha$ 和测量噪声标准差 $\beta$ 的值，以获得更准确的电池SOC估计结果。