

延长电池供电的BLDC续航能力的深层考虑

陈珍柱

2022.05.19

精测仪器



人工智能和工业4.0下的电机行业发展机遇

电池供电下电机驱动产品续航的焦虑



我们今天的内容：

- ✓ 电池供电产品的功耗特性和续航评估
- ✓ 电池的特性
- ✓ 电池模拟和三个重要提示
- ✓ 演示： 电池模拟的实现



电池供电设备的功耗特性和测试挑战

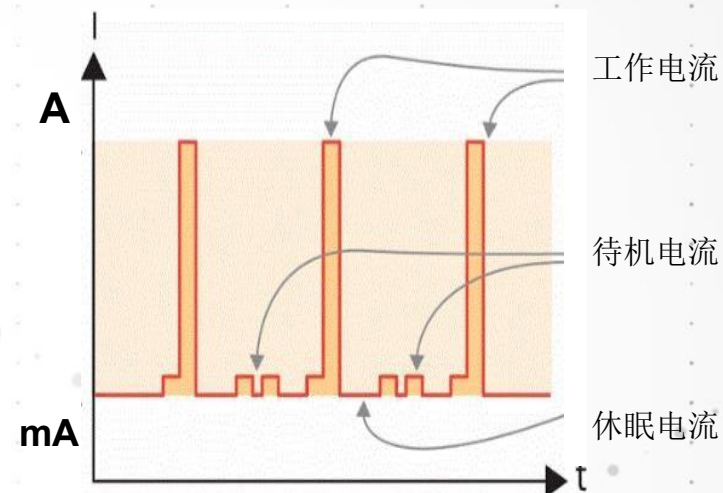
电流随工作场景大动态范围复杂变化、持续时间变化大

功耗特性

- 时间：
 - 电流转换速度快，需要更快的采样率
 - 应用场景复杂，需要长时间测量
- 幅度
 - 休眠电流小， μA – mA 级
 - 工作电流大， mA 、 A 甚至数百 A ，需要极高的动态电流测量能力（ A/D 垂直分辨率）

对测试手段的挑战

- 高采样率、高分辨率、即可以捕获瞬态，也可以长时间记录
- 电流测量必须是高动态范围、高灵敏度和无压降
- 对海量数据的优化处理和分析能力



从直流电源分析仪到APS

准确评估功耗的手段： 从微瓦带百千瓦



N6705C, 60V, 50A, 500W



- 1-4路的电源和负载
- 大功率任意波形发生器
- 电压、电流示波器
- 长时间电压、电流数据记录
- 无缝量程的电流测量
- 内置电池内阻仿真
- 内置电量计
- 功能强大的分析软件和拖拽式测试序列软件

BV9200 + Test Flow



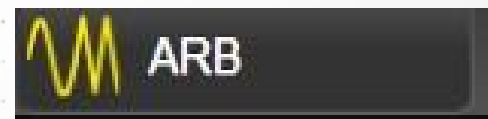
RP7900, 2000V, $\pm 800A$, 20KW
并机可达400KW



N7900, 160V, $\pm 200A$, 2KW

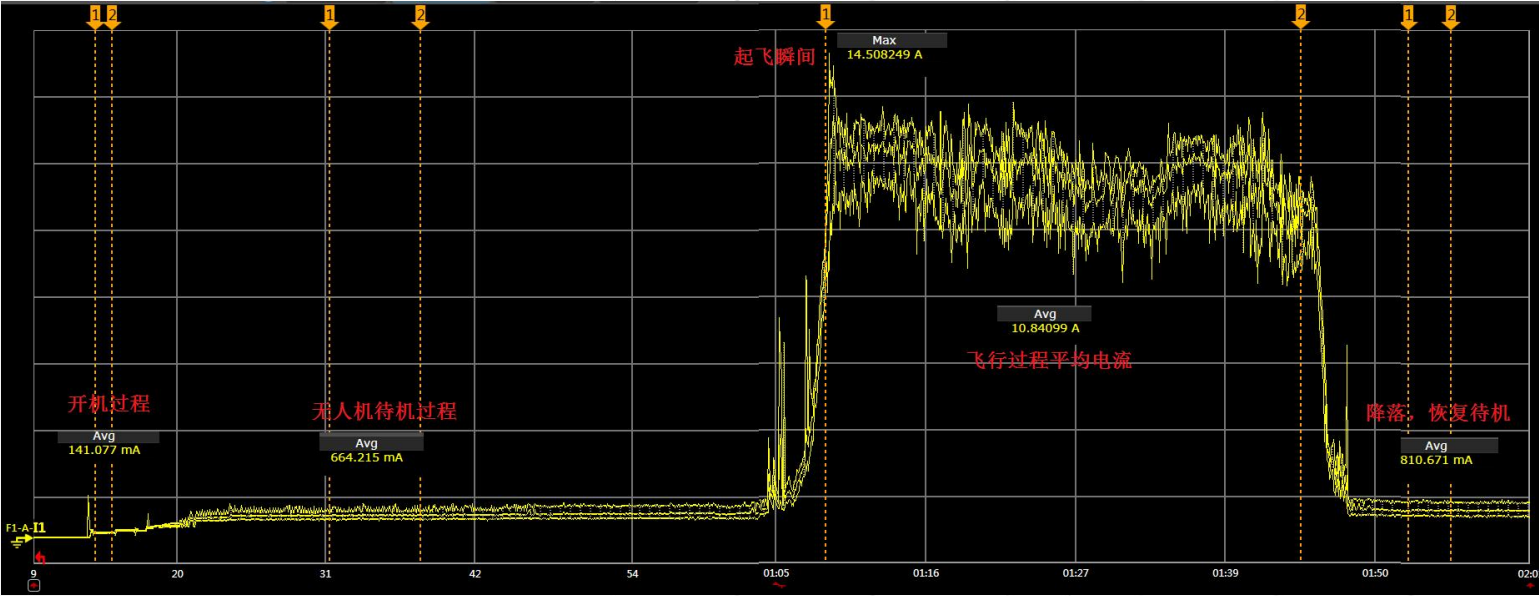
BV9200B 先进电源控制软件

- 同时控制4台 **N6705 /N7900 /RP7900**
- 4种操作模式: **scope** (短时间波形分析); **data logger** (长时间波形分析), **ARB** (64KSa波形编辑) 和 **CCDF** (统计分析):
 - 示波器模式, 200KSa/s, 18比特, 精确捕获电压和电流瞬态变化。
 - Data Logger记录仪模式, 200kSa/s 采样, 最高28bit分辨率, 长达1000小时连续数据直接保存到PC。
 - 实现64K复杂波形编辑, 支持内置标准波形, 公式, 波形导入等
- 支持API函数调用, 用户可进行软件二次开发



典型的智能产品

无人机的功耗测试



模式/ 状态	开机	待机	起飞和飞行	降落待机
起始时间	0:14	00: 34	1:09	1: 52
截至时间	0:16	00: 44	1:45	1: 56
平均电流 (A)	0.14108	0.66421	10.84	0.81067
最大电流 (A)	0.18558	1.03	14.51	1.128

- ✓ “操作无人机起飞，降落”从开机->连接WIFI->起飞->降落过程；
- ✓ 软件实时记录所有操作过程电流变化。



电池续航时间的评估

问题



平均功耗电流: xx mA

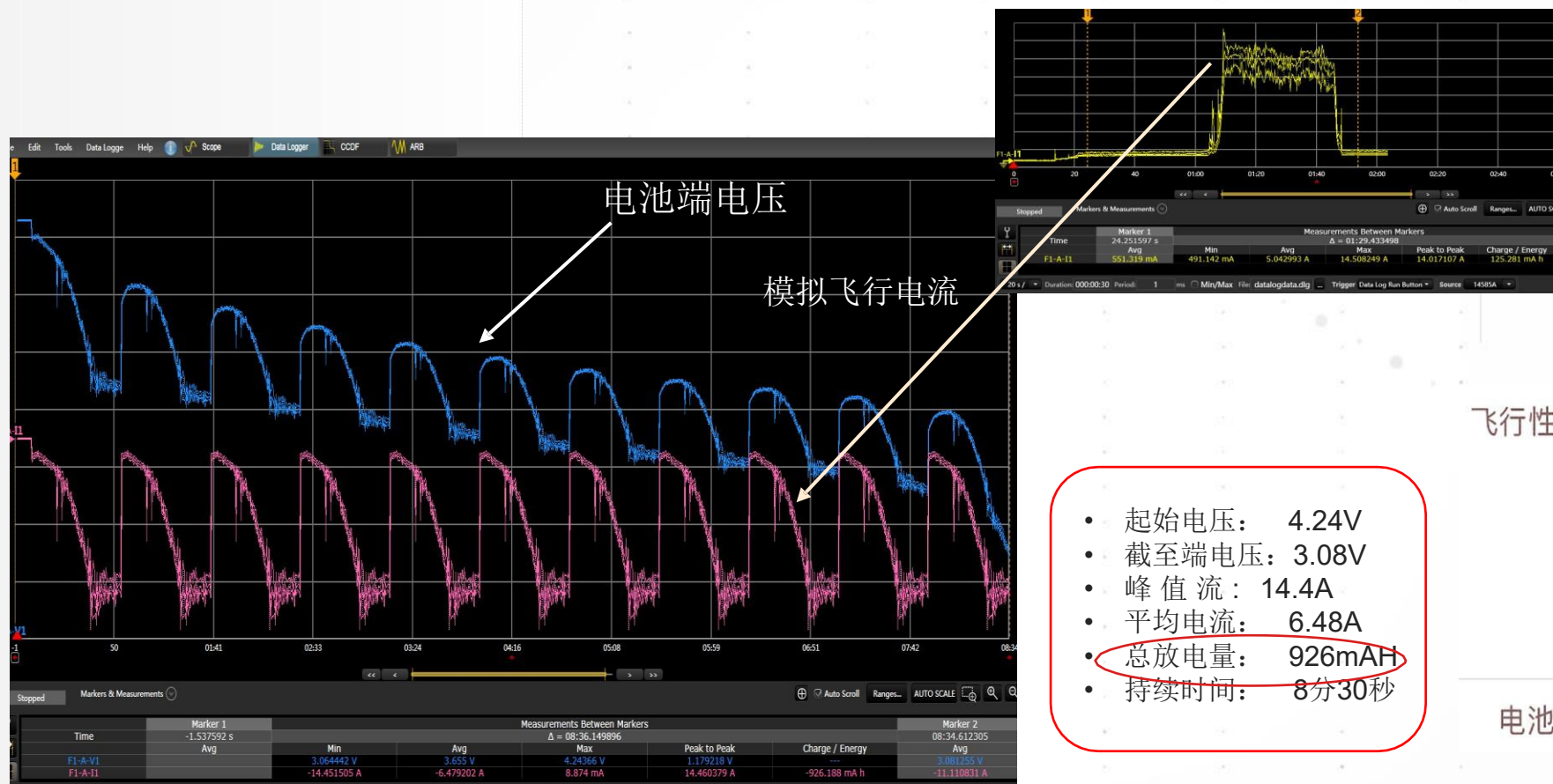
$$\text{续航时间} = \frac{yy \text{ mAh}}{xx \text{ mA}}$$



电池容量: yy mAh

无人机电池飞行续航时间和容量验证

想当然可能会出错



飞行性能

最大飞行距离:	100米
最大飞行高度:	10米
最大飞行速度:	8m/s
最长飞行时间:	13分钟
可拆卸电池:	1.1AH/3.8V

电池

技术规格书的指标和实测近相差20%?

我们今天的内容：

✓ 产品的功耗特性和续航评估

✓ 电池的特性

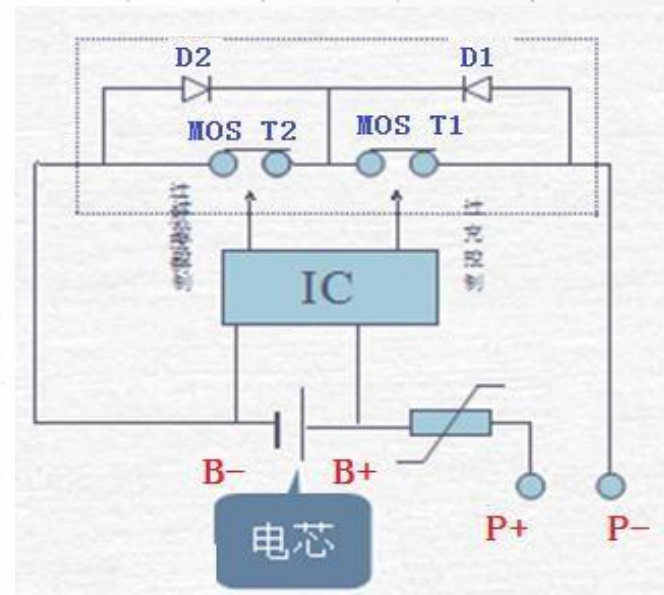
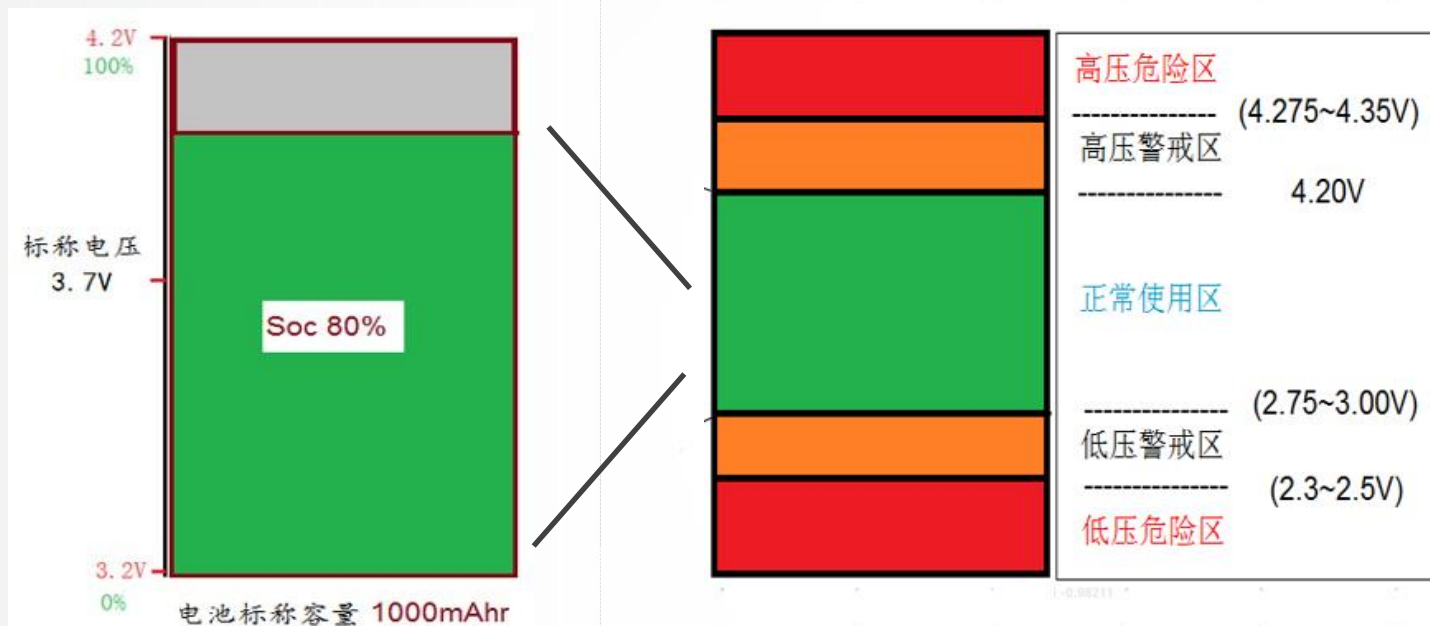
✓ 电池模拟和三个重要提示

✓ 演示： 电池模拟的实现



初识锂电池

电芯、模组和电池包



电池保护电路

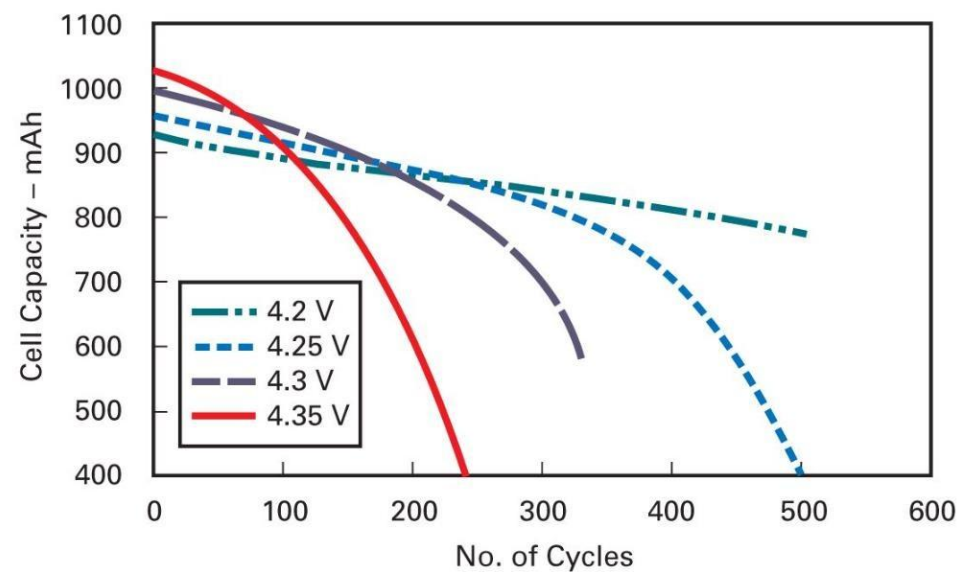
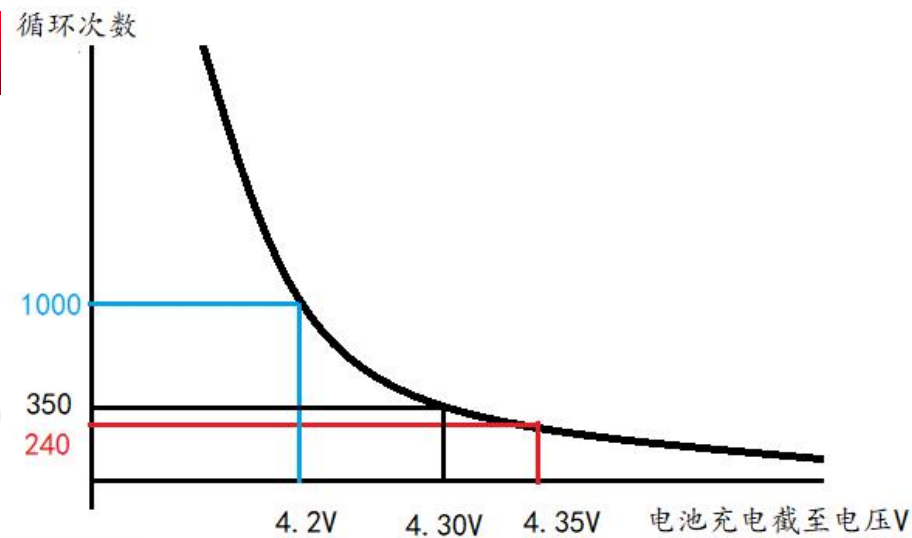
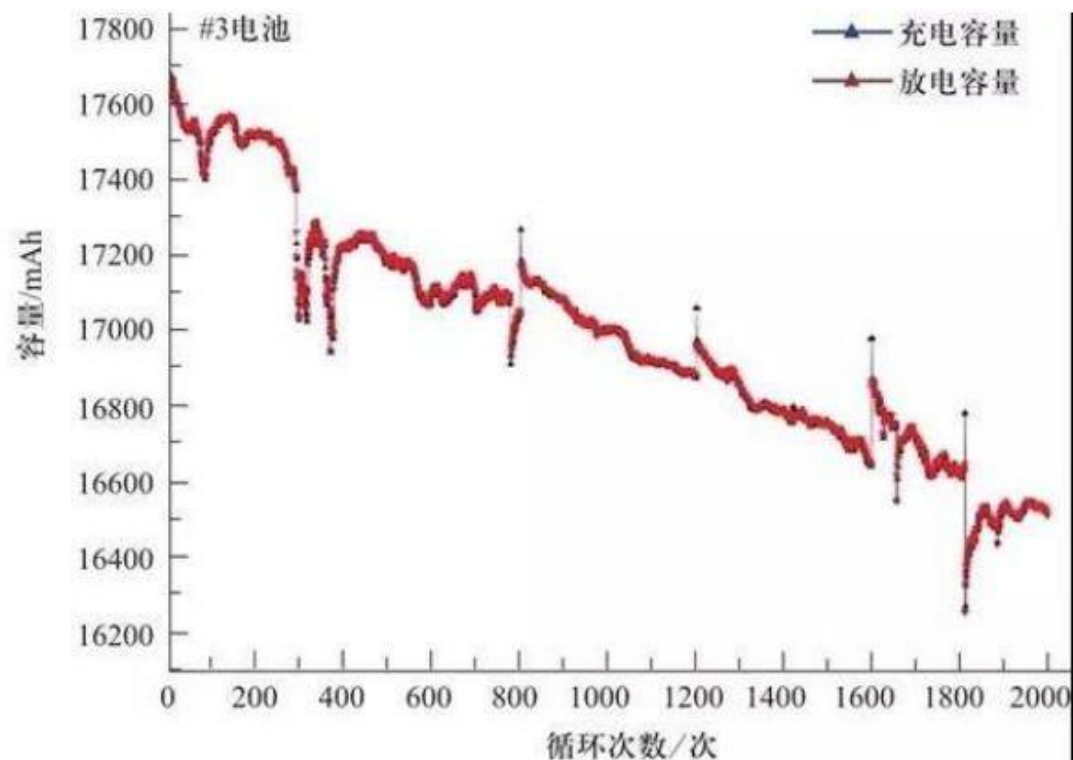
松下18650
3400mAh



锂电池的几张非常重要曲线

电池寿命与截至电压

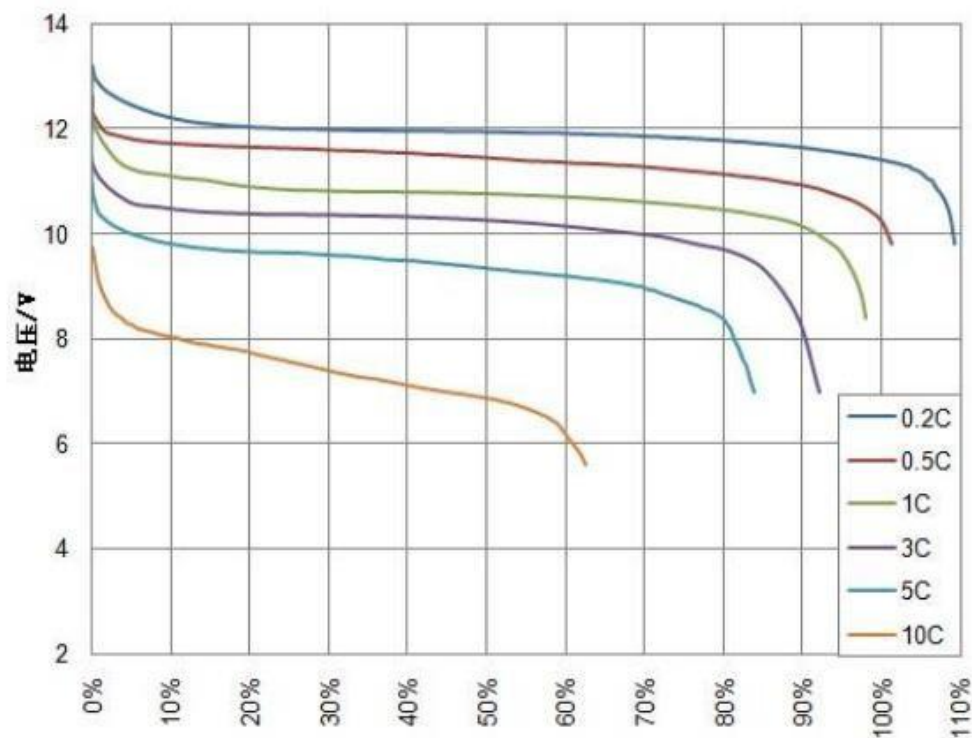
循环寿命和容量衰减



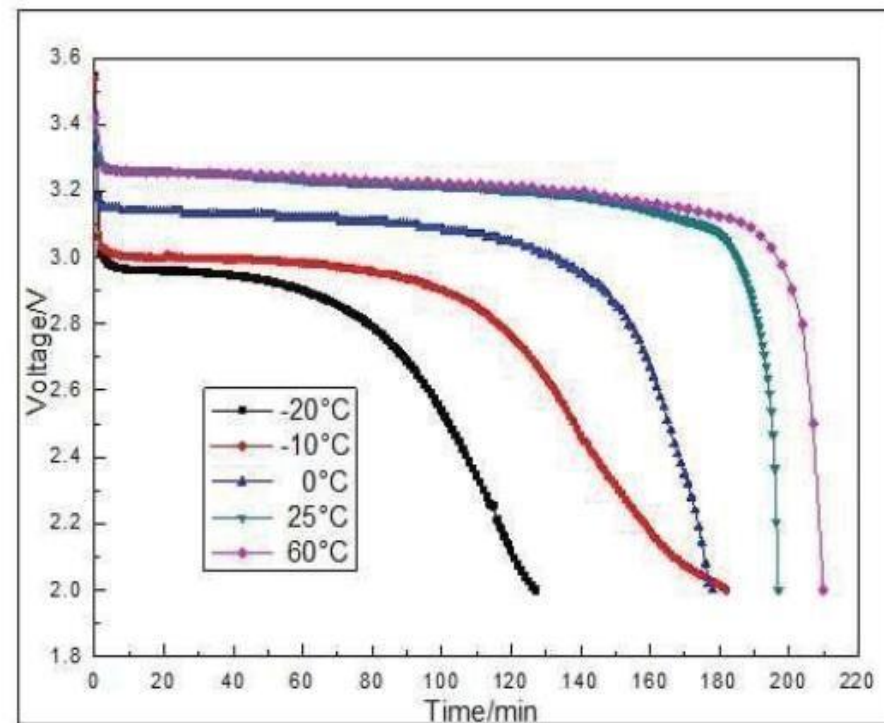
锂电池非常重要的曲线

电池容量与温度/倍率关系

放电容量vs倍率



放电容量vs温度



电池重要参数

内阻、端电压、开路电压



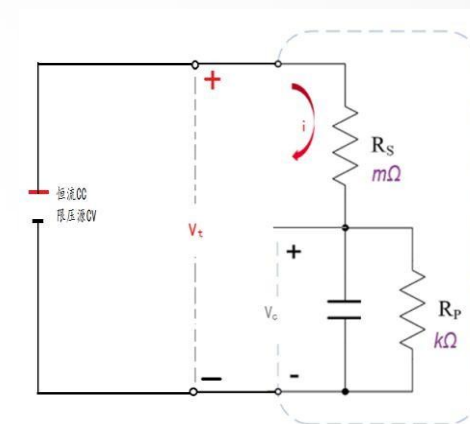
开路电压3.79V



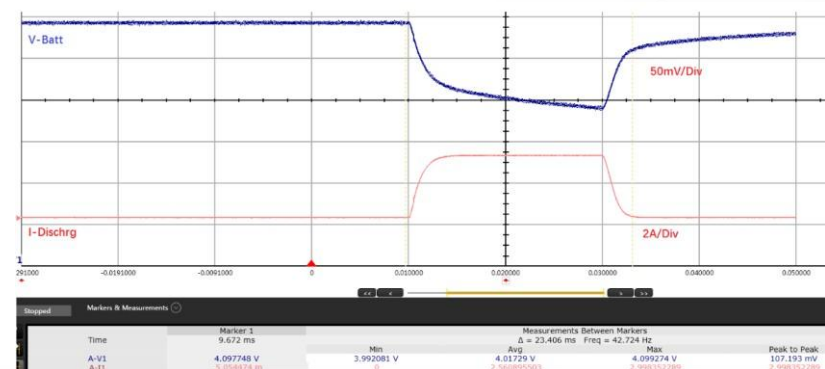
1A充电时，电压3.95v



1A放电时，电压3.31V



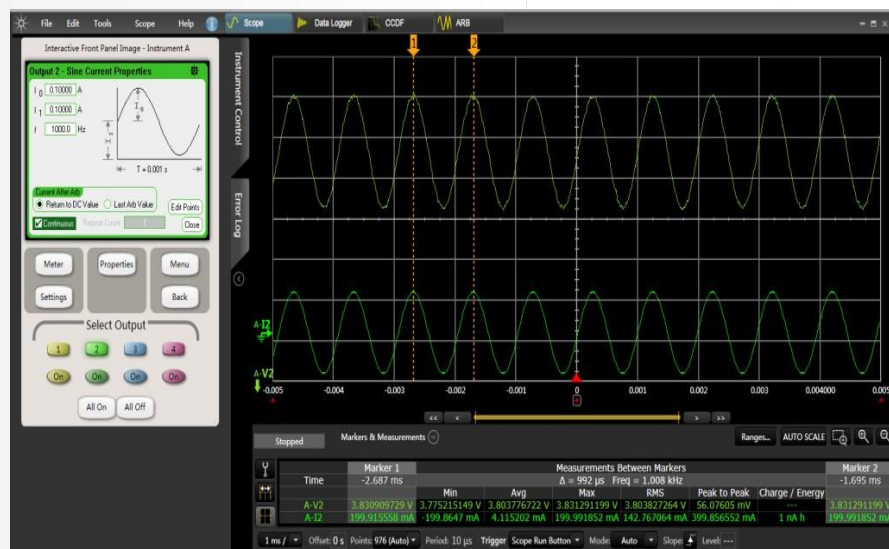
$$I_{\max} = \frac{V_{\text{chrg}} - V_c}{R_s}$$



$$V_t = V_{oc} - I * R_s$$

电池内阻

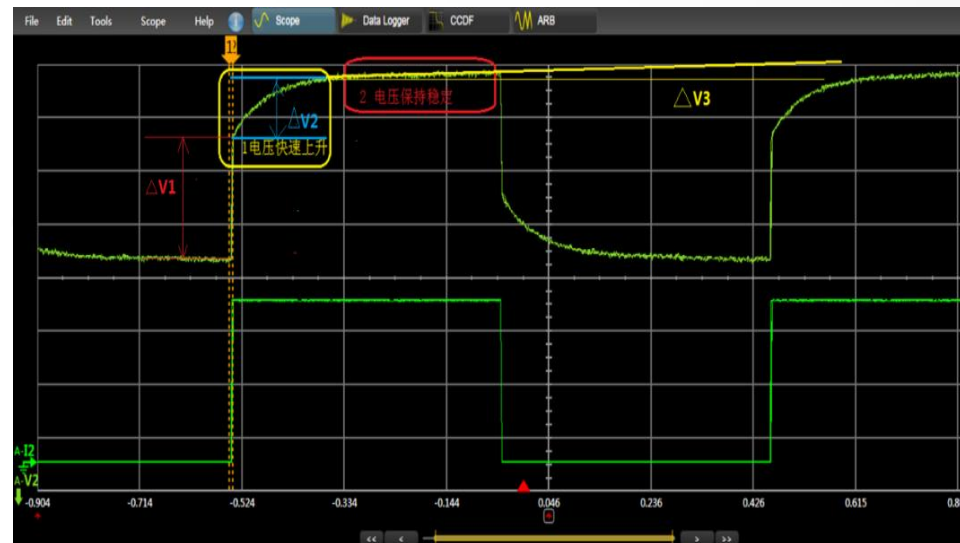
直流内阻和交流内阻



ACR: 1KHz 正弦激励,
 $V/I = 56\text{mV}/399\text{mA} = 140 \text{ 毫欧}$



手机无线收发, 主要表现为ACR



给电池施加脉冲电流 I , 并测量电池电压 V

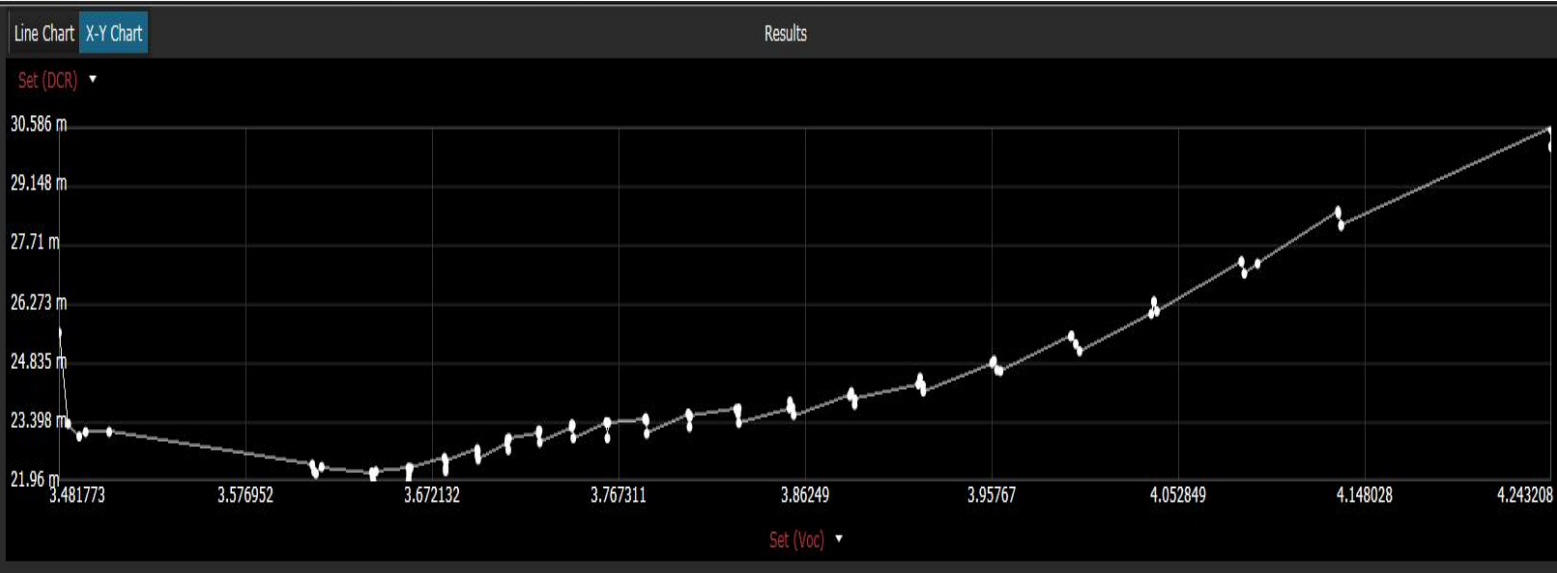
- $\Delta V1$ 为电池电压随电流突变, 欧姆内阻/交流内阻ACR, $\Delta V1/I2$;
- $\Delta V2$ 为电池极化电压缓慢变化, 极化内阻/直流内阻DCR, $(\Delta V2 + \Delta V1) / I2$;
- $\Delta V3$ 为电池在电流 I 充电时电压上升率, 体现了电池的容量 $C = I2 \cdot t / \Delta V3$



汽车动力系统, 主要表现为DCR

多变的电池内阻

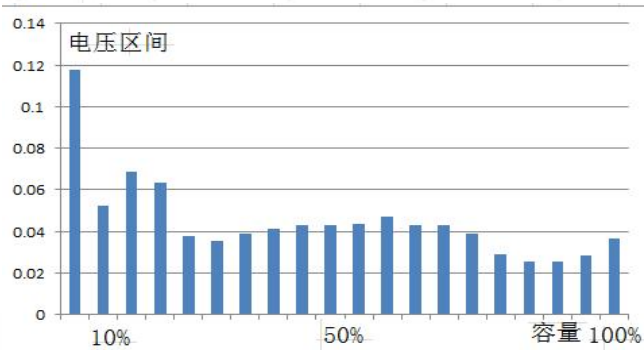
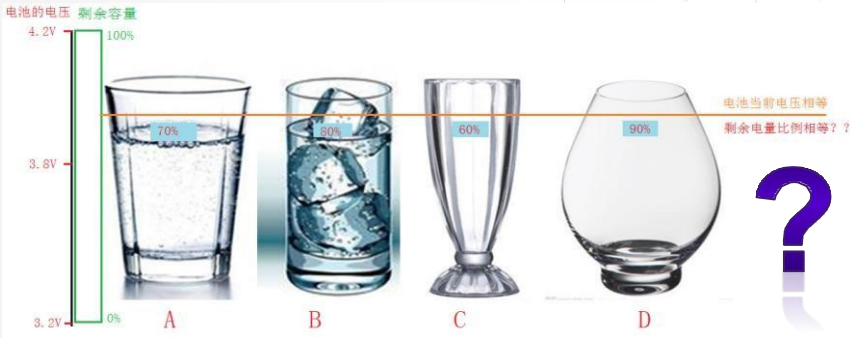
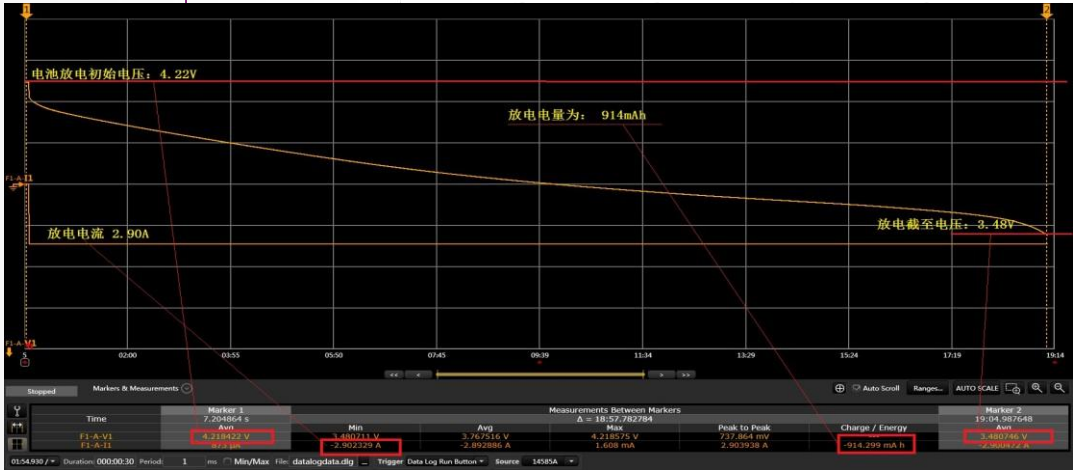
温度和容量SOC的影响



Percentage charge	RBatt Scale Factor		
	-20°C	0°C	25°C
100	1223	289	100
95	1142	283	103
90	1150	284	102
85	1114	285	106
80	1101	291	111
75	1097	291	118
70	1101	276	126
65	1106	269	110
60	1119	271	102
55	1138	280	102
50	1164	295	108
45	1196	317	116
40	1245	343	122
35	1319	362	121
30	1428	363	121
25	1665	380	126
20	2216	447	152
15	3248	535	187
10	5502	700	236
9	6454	744	247
8	7404	788	259
7	8355	702	233
6	9307	702	247
5	9269	752	260
4	10192	834	277
3	12216	1011	304
2	14942	1388	351
1	18629	2014	423
0	23448	3057	528

电池容量分布

电池端电压 **VS.** 容量



Soc (%)	Voc (V)
0%	3.3
5%	3.417419645
10%	3.469712651
15%	3.538586398
20%	3.601882875
25%	3.639315377
30%	3.674645796
35%	3.713511828
40%	3.754836719
45%	3.797917202
50%	3.84076305
55%	3.884100026
60%	3.930903831
65%	3.974087812
70%	4.016838519
75%	4.055635768
80%	4.084480586
85%	4.109850219
90%	4.135330419
95%	4.163642325
100%	4.199976858

我们今天的内容：

- ✓ 产品的功耗特性和续航评估
- ✓ 电池的特性
- ✓ 电池模拟和三个重要提示
- ✓ 演示： 电池模拟的实现



电池模拟器的应用

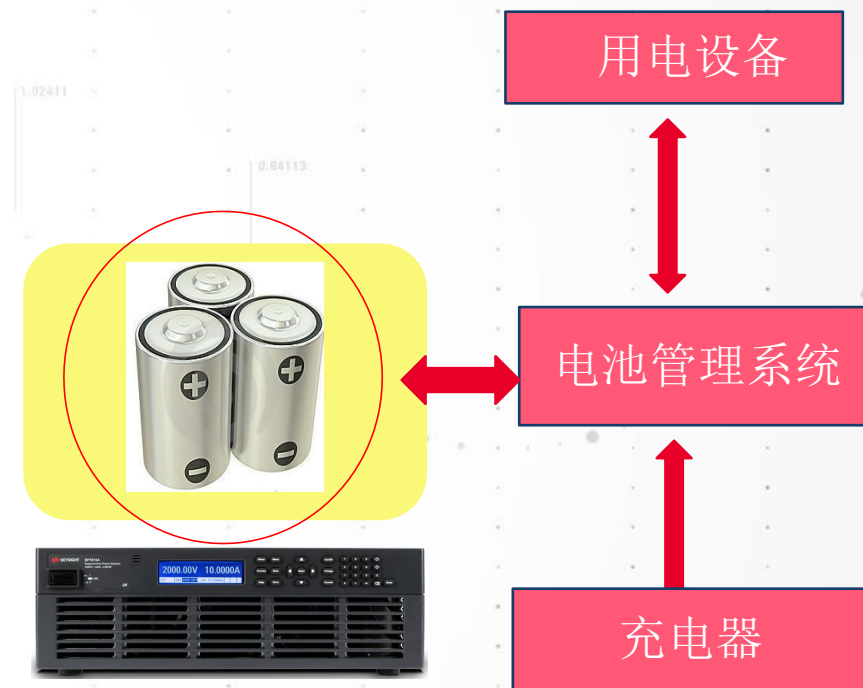
减少研发电池管理原型机的不确定性， 缩短开发时间

电池组直接供电

- 电池状态调节困难，如Soc容量，内阻，循环次数，温度变化等
- 电池状态受温度、循环次数、压力等影响大、重复性差。
- PCS/BMS等研发测试、如果失效将导致电池的过充/放，甚至安全隐患
- 需要使用其它的测量设备监控电压、电流、电量等参数。

电池模拟器

- ✓ 适用于任意的规格的电池模型（电压，电量不限）
- ✓ 内置电池内阻仿真（符合电池端电压，开路电压、电量变化规律）
- ✓ 任意设置电池模拟的起始点（研发调试灵活）
- ✓ 模拟电池端电压与电量变化（随充、放电过程改变电压）
- ✓ 强大的保护，无任何电池安全隐患和风险

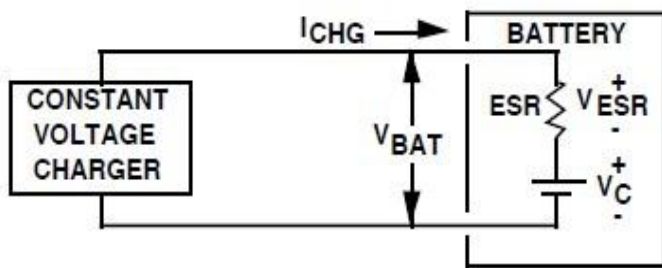


蓄电池等效模型和蓄电池供电特性

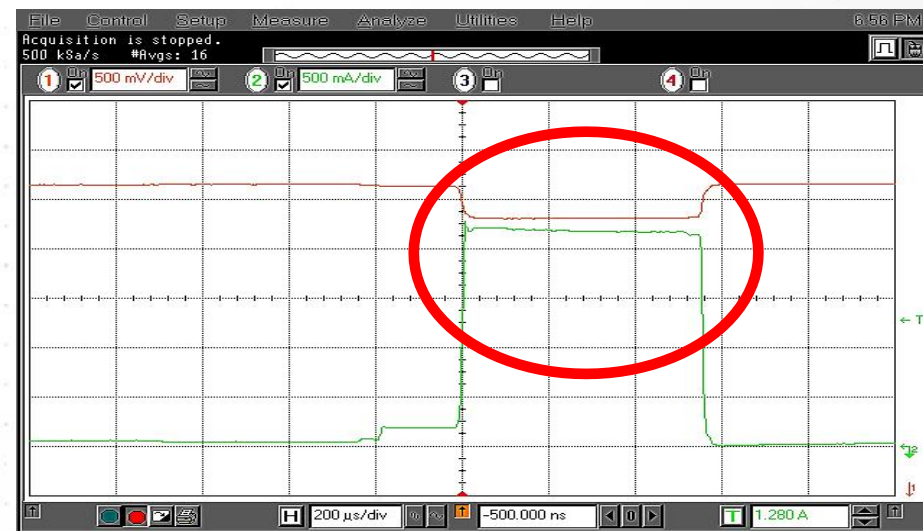
端电压和开路电压

- 蓄电池模型可以等效为理想恒压源 V_C 与内阻 ESR 串联
- 充电时，电流流入电池， V_{bat} （电池端电压） $> V_C$ （电池开路电压）
- 放电时，电流流出电池， V_{bat} （电池端电压） $< V_C$ （电池开路电压）

实际效果：当负载电流变化时，电池端电压会随之产生波动

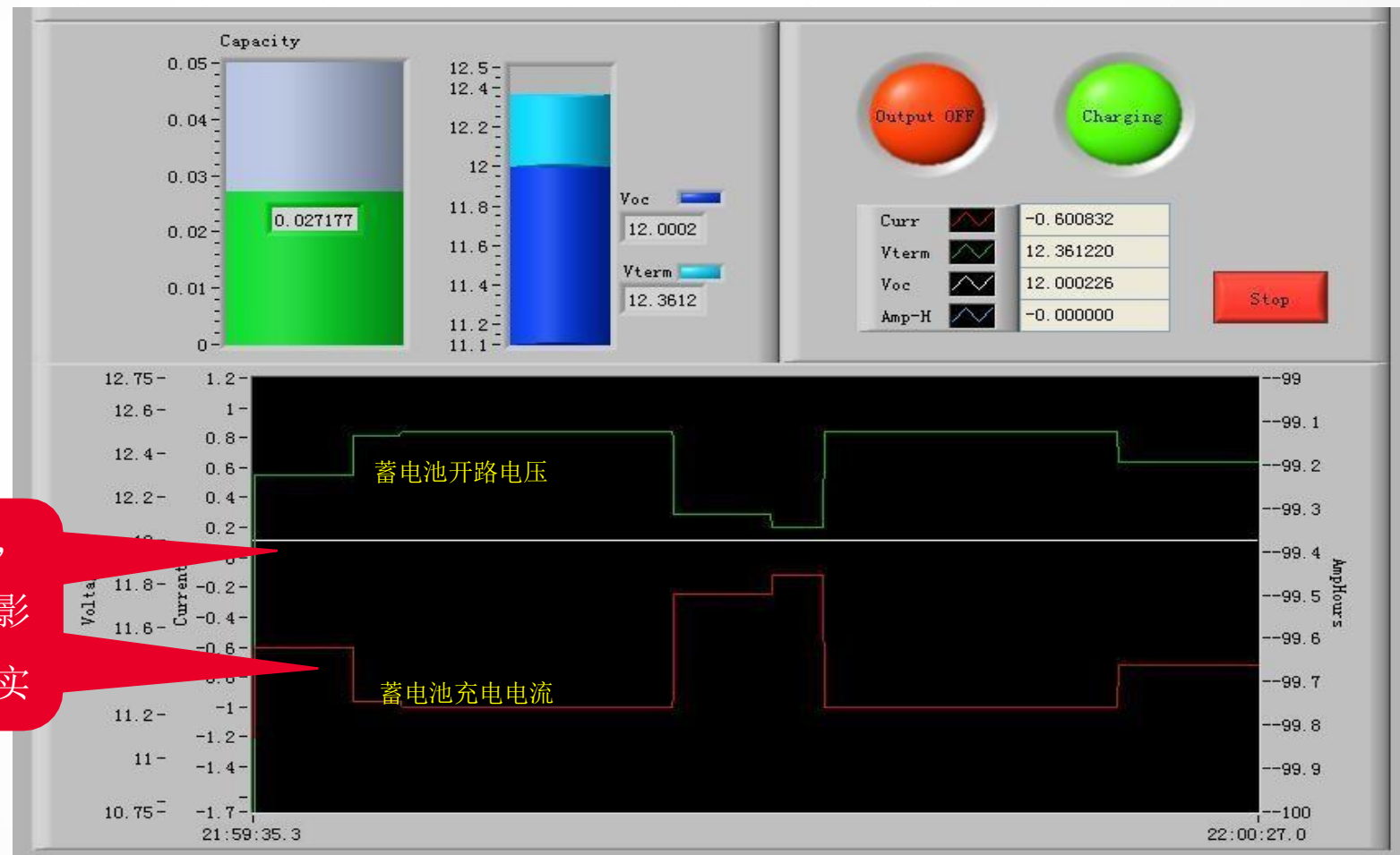


$$\begin{aligned}V_{ESR} &= I_{CHG} \times ESR \\V_{BAT} &= V_C + V_{ESR} \\V_{BAT} &= V_C + (I_{CHG} \times ESR)\end{aligned}$$



APS电池内阻仿真功能

任意设置电池电流和内阻，模拟输出端电压



电池模型提取 (Profiler)

电量、内阻随开路电压的变化

DCR	Voc	Ahr	Soc	ΔVoc
0.027	3.440	0.000	0.000	0.000
0.026	3.657	0.040	4.279	0.217
0.027	3.716	0.081	8.605	0.059
0.028	3.735	0.123	12.983	0.019
0.029	3.762	0.163	17.298	0.027
0.030	3.788	0.204	21.643	0.025
0.031	3.811	0.246	26.065	0.023
0.031	3.828	0.288	30.511	0.017
0.031	3.841	0.330	34.895	0.012
0.030	3.852	0.371	39.247	0.012
0.030	3.866	0.412	43.597	0.014
0.029	3.882	0.453	47.950	0.016
0.029	3.900	0.494	52.295	0.018
0.028	3.922	0.535	56.644	0.022
0.028	3.948	0.576	60.990	0.025
0.027	3.976	0.617	65.336	0.029
0.027	4.006	0.658	69.703	0.030
0.027	4.037	0.699	74.050	0.031
0.027	4.070	0.740	78.412	0.033
0.027	4.105	0.782	82.768	0.035
0.027	4.143	0.823	87.121	0.037
0.027	4.182	0.864	91.462	0.039
0.028	4.213	0.904	95.710	0.031
0.028	4.236	0.944	100.000	0.024

Operation Mode:

Profiler

Function:

Discharge



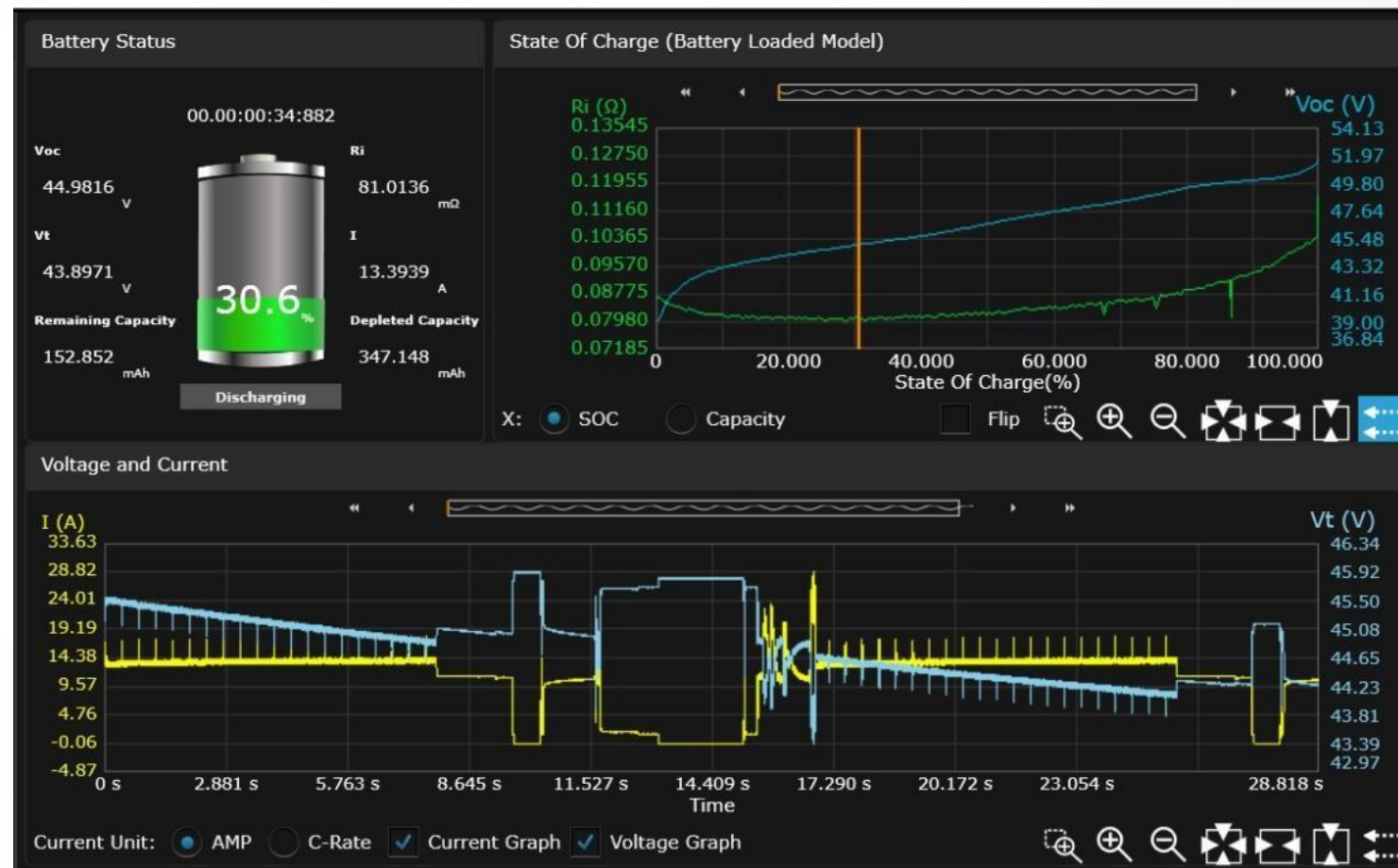
电池模拟器 (Emulate)

模拟真实的电池

Operation Mode:

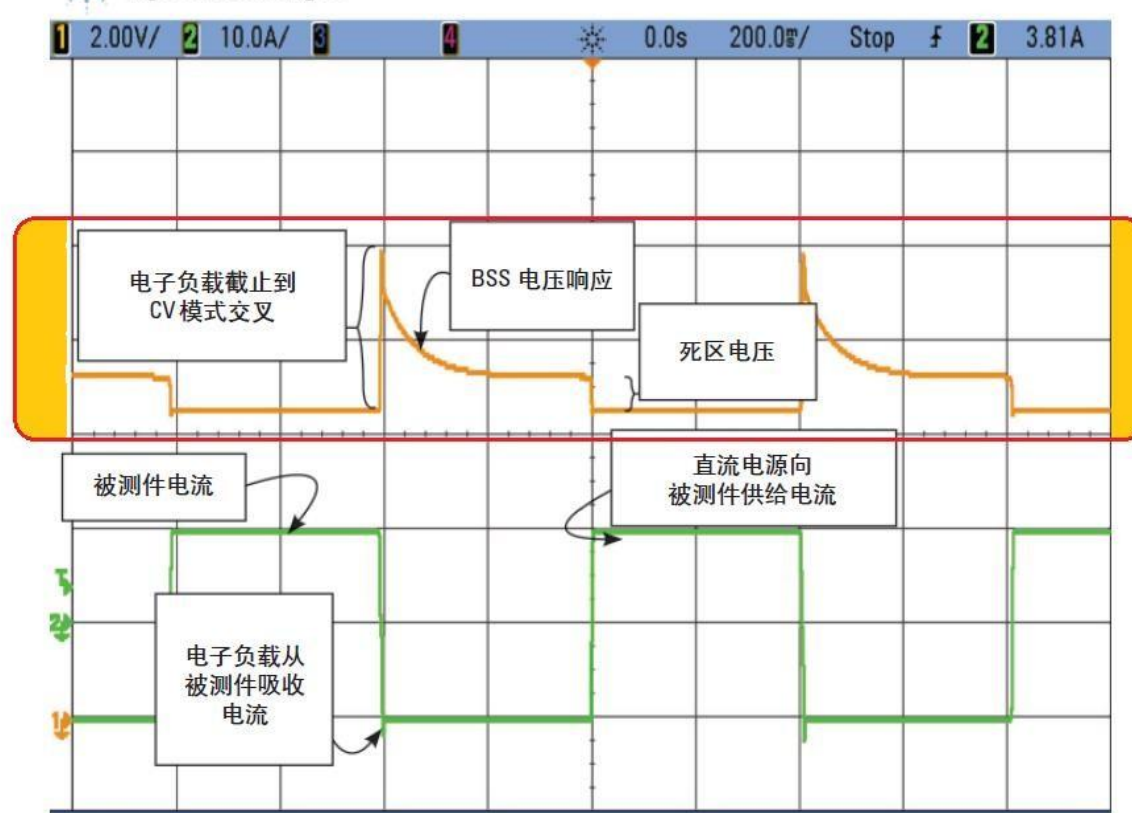
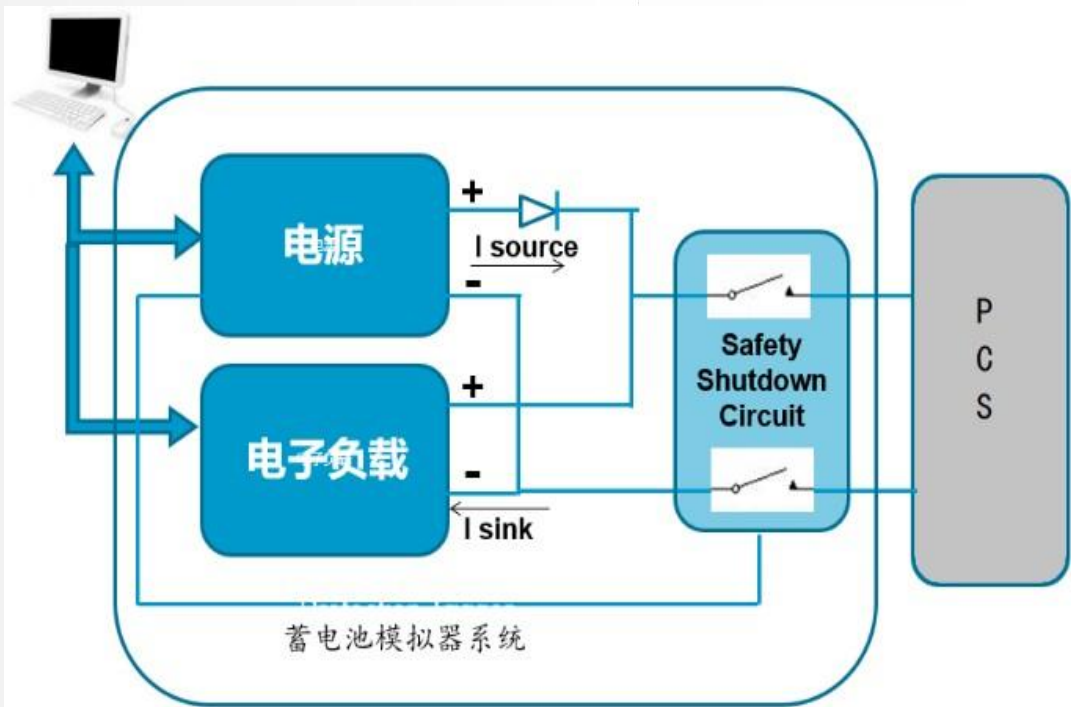


Emulate



电池模拟提示 1

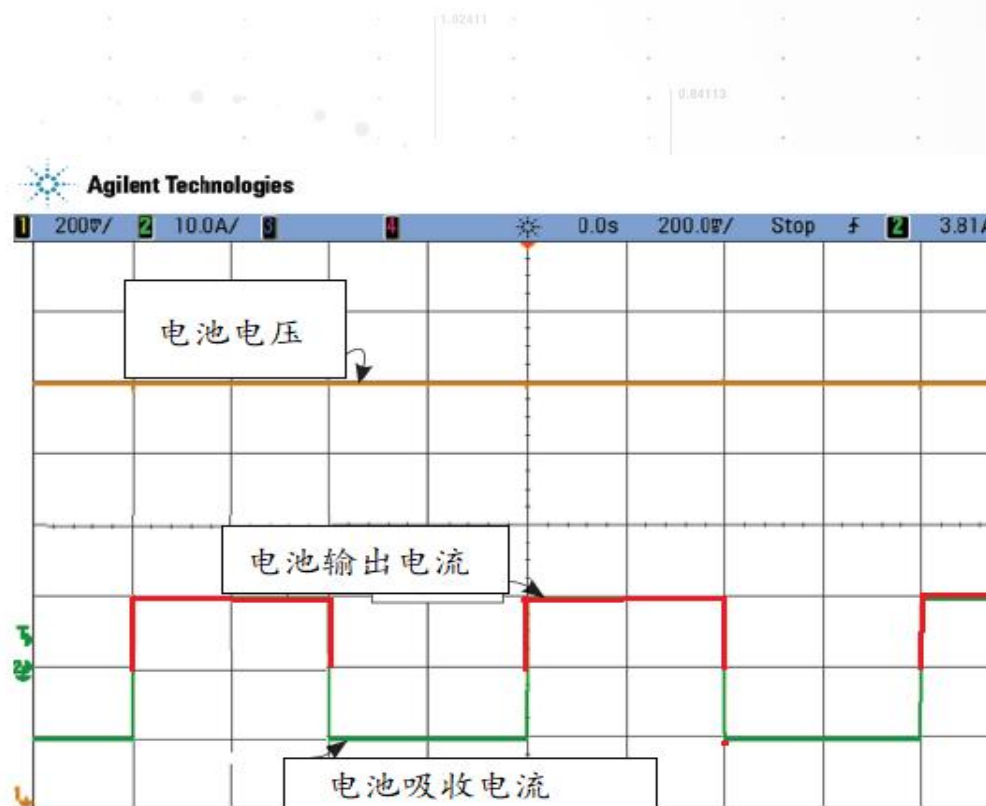
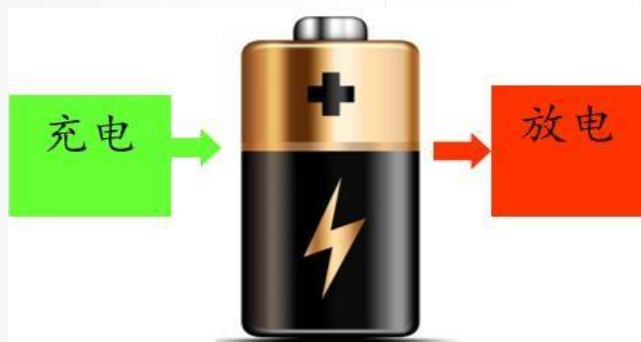
电源 + 负载模式存在的问题



电池模拟器”的提示1

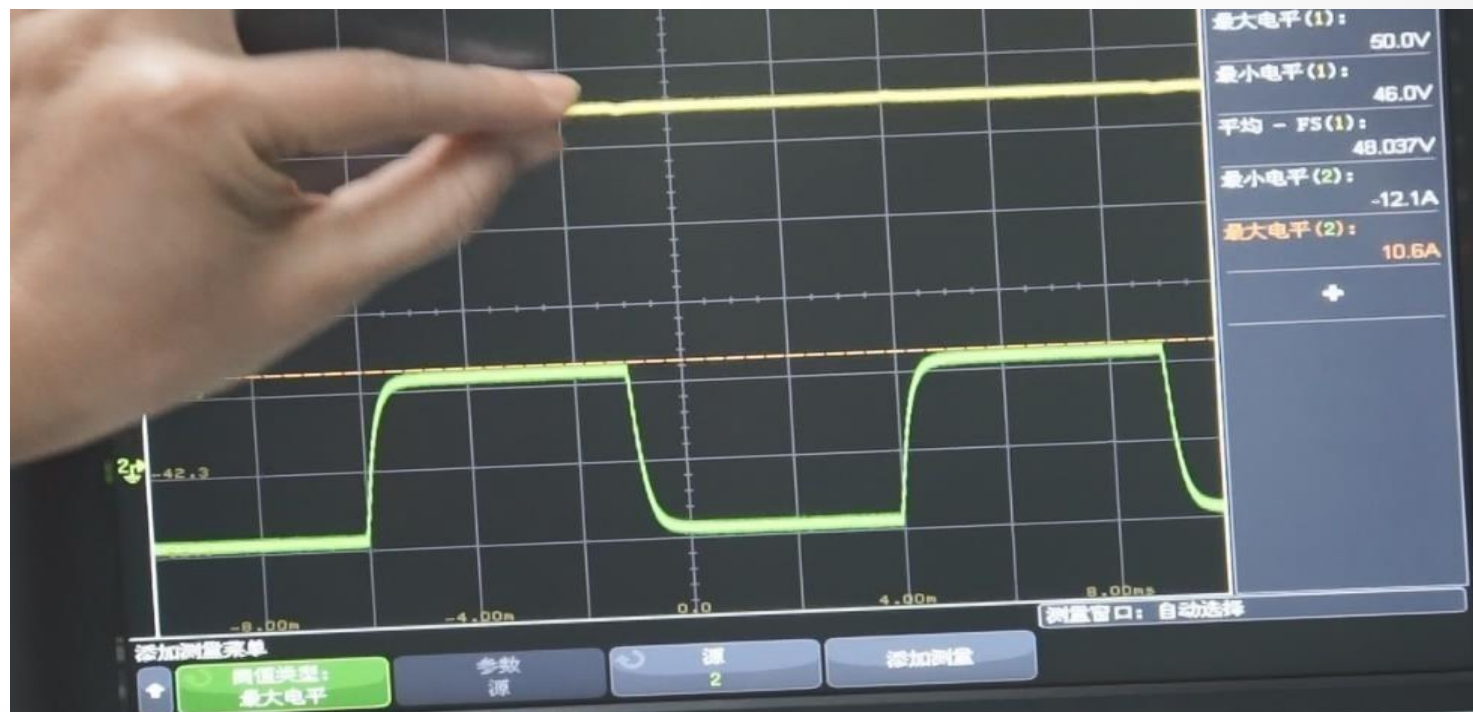
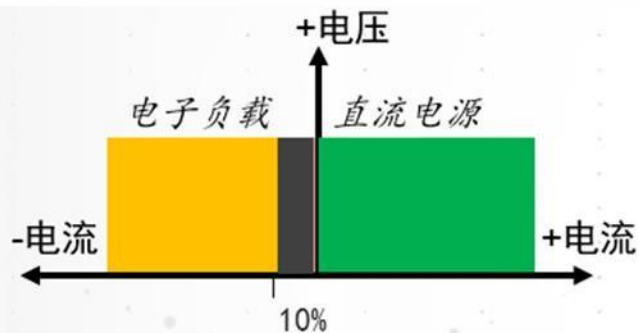
无缝正/负电流切换

理想的电池一个**恒压源CV**，而且电流输出和吸收转换时是**无缝**，即电池电压不会因为电流的正负转换而突变。



电池模拟器提示1

APS 双象限，无间隙的负载和源的转换



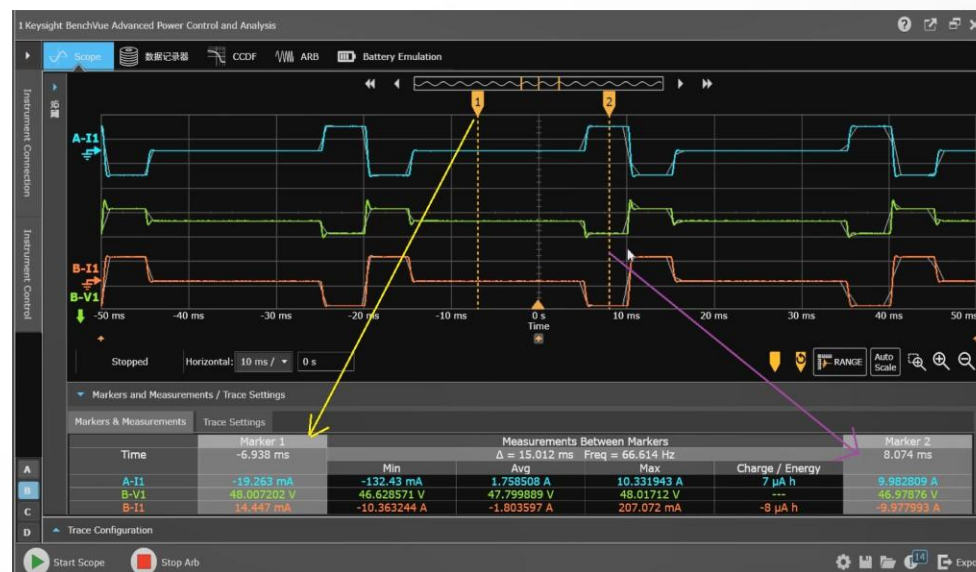
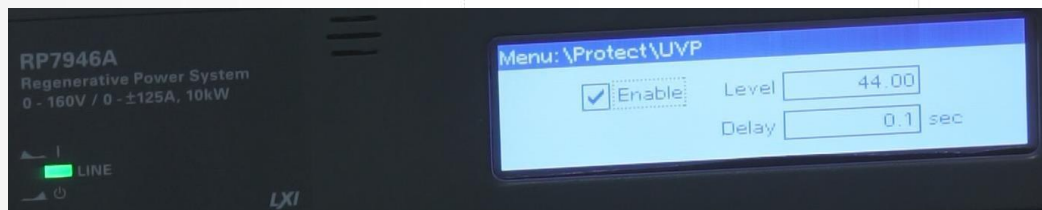
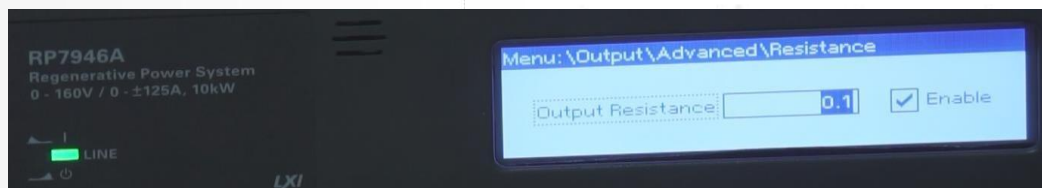
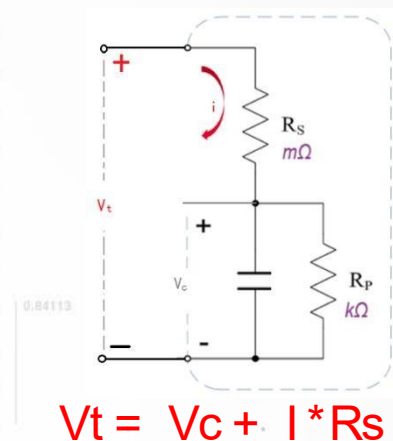
正负电流穿越时，极小的电压变化

电池模拟提示 2

内阻模拟、OVP、UVP，电量计

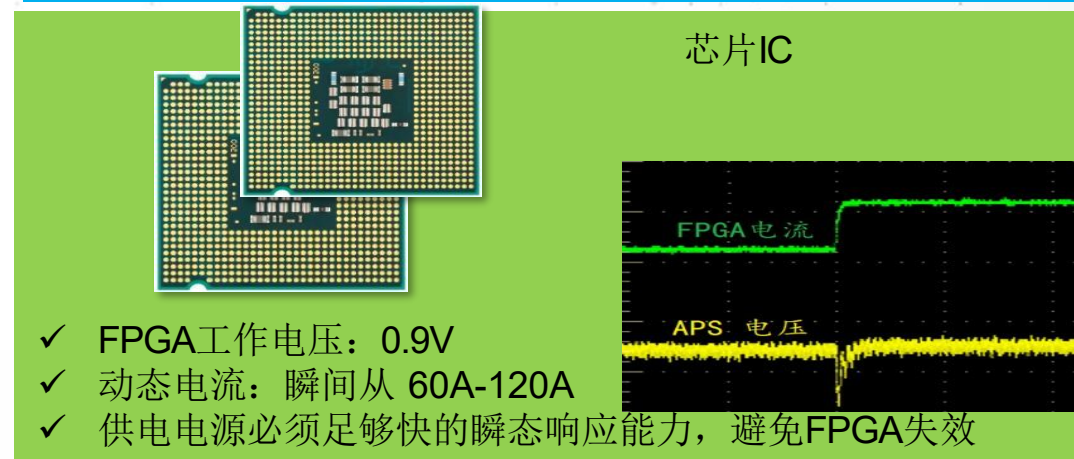
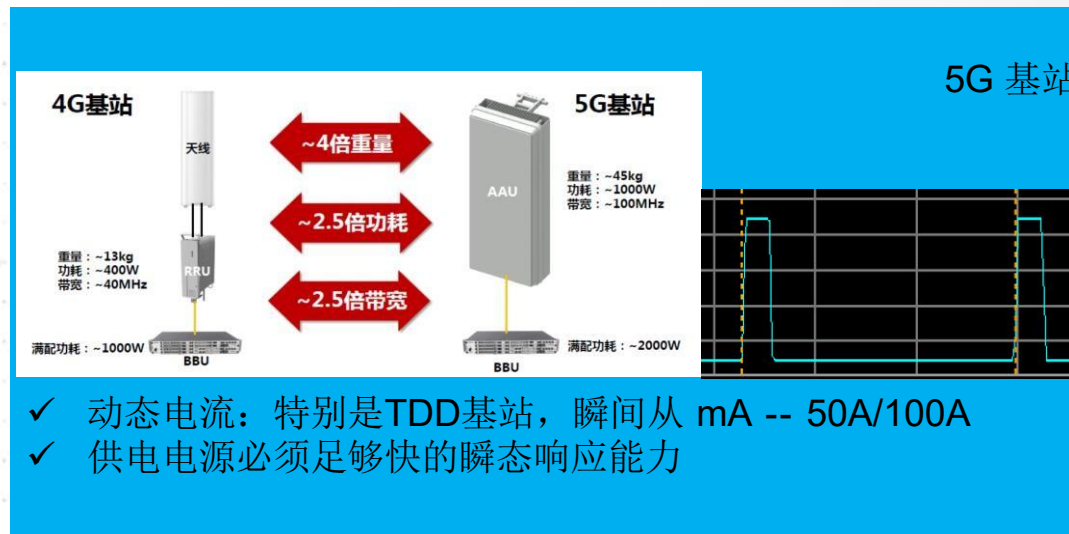
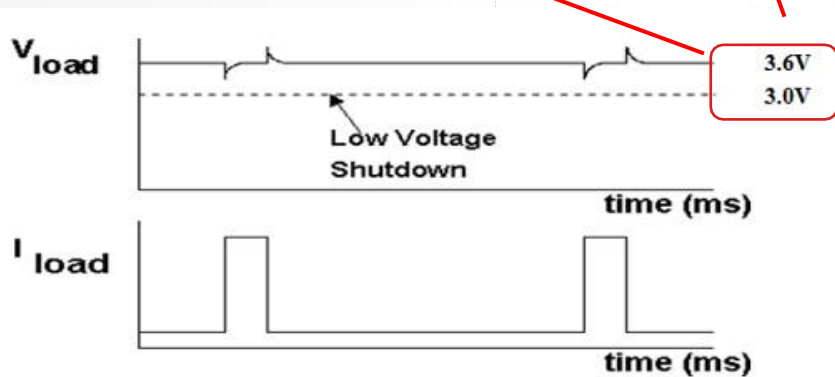
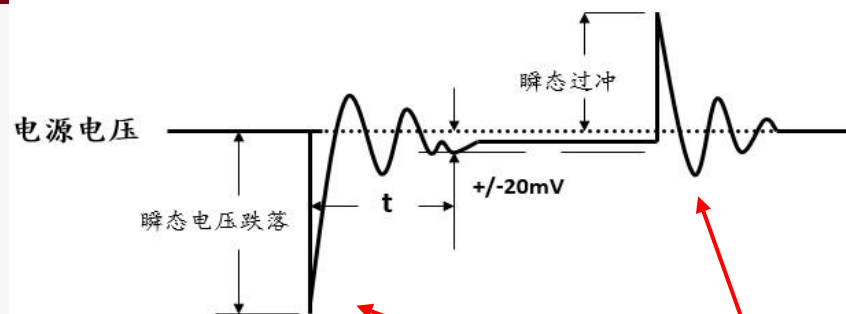
电池内阻是电池非常关键的核心参数，影响各种电池曲线！

- ✓ 放电倍率容量衰减曲线
- ✓ 充电曲线的CC和CV位置
- ✓ 电池实时电压的变化大小



电池模拟提示 3

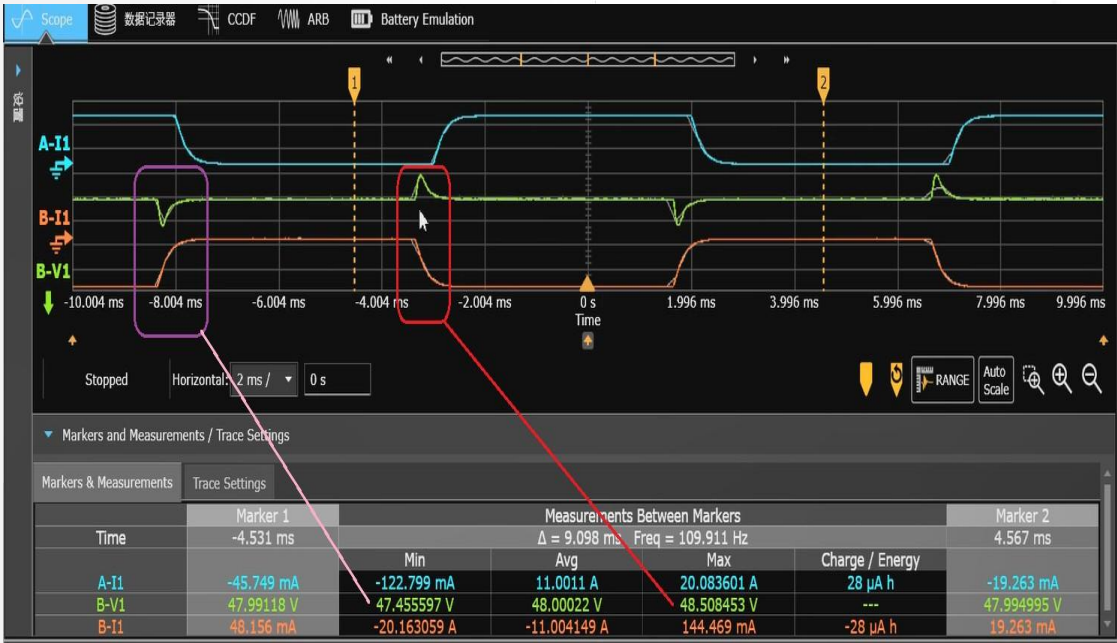
动态负载——超快的瞬态响应时间(< 10US)



APS 模拟电池性能

APS 具有绝佳的瞬态 / 保护等响应

锂电池几乎接近理想电源，任何直流电源的瞬态响应速度都不可能优于锂电池（锂电池可看作超级电容）
如下图所示，上述RP7946A模拟的48V电池，在电流 0, 20A变化时，电压波动极小（0.5V/48V ,约 1%）。



Specification	RP7931A/ RP7941A	RP7932A/ RP7942A	RP7933A / RP7943A	RP7935A/ RP7945A	RP7936A/ RP7946A
DC ratings					
Voltage source	0 to 20 V	0 to 80 V	0 to 20 V	0 to 80 V	0 to 160 V
Current source and sink	0 to $\pm$ 400 A	0 to $\pm$ 125 A	0 to $\pm$ 800 A	0 to $\pm$ 250 A	0 to $\pm$ 125 A
Power	0 to $\pm$ 5 kW	0 to $\pm$ 5 kW	0 to $\pm$ 10 kW	0 to $\pm$ 10 kW	0 to $\pm$ 10 kW
Output ripple and noise					
CV peak-to-peak ¹	30 mV	80 mV	30 mV	80 mV	200 mV
CV rms ²	3 mV	8 mV	3 mV	8 mV	20 mV
Load regulation					
Voltage	1 mV	3 mV	1 mV	3 mV	6 mV
Current	25 mA	13 mA	50 mA	25 mA	13 mA
Voltage programming and measurement accuracy ³					
	0.02% + 2 mV	0.02% + 8 mV	0.02% + 2 mV	0.02% + 8 mV	0.02% + 16 mV
Current programming and measurement accuracy ³					
	0.04% + 45 mA	0.03% + 13 mA	0.04% + 90 mA	0.03% + 25 mA	0.03% + 13 mA
Transient response ⁴					
Recovery time	300 μ s	300 μ s	300 μ s	300 μ s	300 μ s
Settling band	0.2 V	0.8 V	0.2 V	0.8 V	1.6 V

Overvoltage protection

Maximum setting:

Accuracy:

Response time:²

1200 V
0.02% + 75 mV
< 30 μ s

2400 V
0.02% + 150 mV
< 30 μ s

BV9210B 电池测试和电池模拟器软件

- BV9210B – 同时4台仪表控制
BV9211B – 单台仪表控制
- 四种操作模式：
 - 电池模型提取
 - 电池模拟器
 - 电池充/放电测试
 - 电池循环充/放电测试
- 提供API接口，允许进行软件的二次开发
- 支持多种仪表，覆盖20W - 400KW 应用领域
 - N6705C/N6700C主机 及 N6781-86A SMU模块
 - N7900A 1KW/2KW APS先进电源系统
 - RP7900 5KW-20KW R-APS 回馈先进电源系统

