

基于 APS 电源硬件 和 Test Flow 软件的电池性能测试 BTS 及 电池模拟器 BSS

*注释

APS - Advanced Power System (先进电源系统, 泛指 Keysight N7900/N6900 系列, RP7900 电源)

Test Flow - Keysight BenchVue 软件中的拖拽式测试流程编辑软件模块

BTS - Battery Test System (泛指电池性能测试系统)

BSS - Battery Simulation System (泛指电池模拟系统)

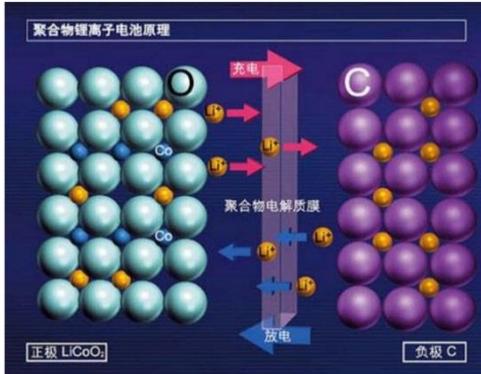
目录

一、关于锂电池和锂电池的几个关键参数.....	2
1.1 锂电池的工作原理.....	2
1.2 锂电池的充电/放电安全和规则.....	2
1.3 锂电池的容量和寿命与充电截至电压的关系.....	3
1.4 锂电池的重要参数.....	4
二、APS 硬件 + Test Flow 软件电池方案.....	5
2.1 APS 先进电源系统硬件平台.....	5
2.1.1 N7900A/N6900A 先进电源系统 - 1/2KW、160V、200A.....	5
2.1.2 RP7900A 回馈式先进电源系统 - 5/10kW、950V、800A.....	6
2.2 Test Flow 软件平台.....	7
2.3 电池测试系统 (BTS).....	8
2.3.1 Test Flow 测试流序列.....	8
2.3.2 电池放电、充电数据和分析.....	9
2.3.2.1 数据在 BenchVue 软件分析.....	9
A、 循环放电、充电容量 (Ahr) 和 测试次序 (n) 分布.....	9
B、 端电压 (Vt) 随 电量 (Ahr) 分布.....	10
C、 直流内阻 (DCR) 随 电量 (Ahr) 分布.....	10
D、 开路电压 (Voc) 随 电量 (Ahr) 分布.....	11
E、 充电电流 随 电池开路电压 Voc 分布.....	11
F、 充电电流 随 电池电流分布.....	11
G、 电池端电压 Vt 随 开路电压 Voc 分布.....	11
2.3.2.2 导出 CSV 数据分析.....	12
A、 循环放电、充电容量 (Ahr) 和 测试次序 (n) 分布.....	13
B、 直流内阻 DCR 随 电池电量 / 开路电压 Voc 分布.....	14
C、 电池充电过程 Vt-Voc-Ichrg-Ahr 分布.....	14
D、 电池充电过程 Vt-Voc-Ichrg-Ahr 分布.....	15
2.4 电池模拟器 (BSS).....	16
2.4.1 电池模拟器 (BSS) 概要.....	16
2.4.2 Test Flow 软件中的电池模拟器 (BSS) 序列.....	17
2.4.3 Test Flow 软件中的电池模拟器 (BSS) 实时监控数据.....	18

一、关于锂电池和锂电池的几个关键参数

1.1 锂电池的工作原理

锂离子电池是一种二次电池(充电电池),它主要依靠锂离子在正极和负极之间移动来工作,如下图所示。

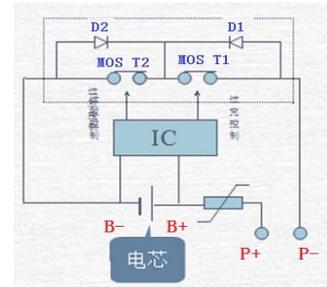
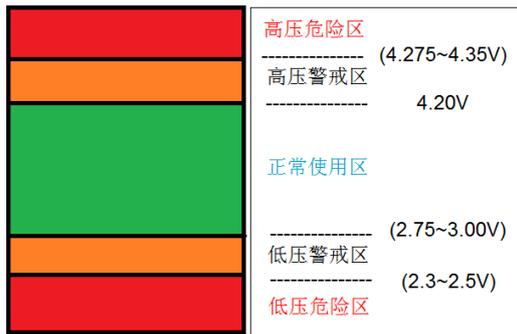


- ✓ **充电时**, 锂离子从正极层状物的晶格脱出, 通过电解液迁移到层状物负极表面后嵌入到石墨材料晶格中, 同时剩余电子从外电路到达负极。
- ✓ **放电则相反**, 锂离子从石墨晶格中脱出, 回到正极氧化物的晶格中。
- ✓ 由于 LixCx 非常活跃, 可以和水发生反应。故电解质选用可溶于有机溶剂的锂盐。但这个使得锂电池相比镍铬、镍氢电池的内阻要大很多。

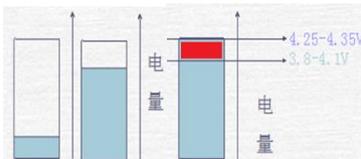
1.2 锂电池的充电/放电安全和规则

众所周知, 锂电池在使用时, 有严格的电压和电流的限制! 譬如短路导致电流过大; 或过充导致电池电压过高, 都有可能引起电池的安全。

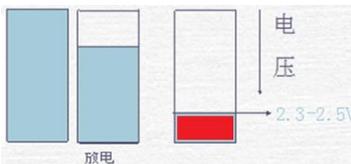
以下将锂离子电池电压的划分为以下几个区域 (不同的电芯制造商虽有区别, 但区别不大)。



电池保护电路 BMS 示意图

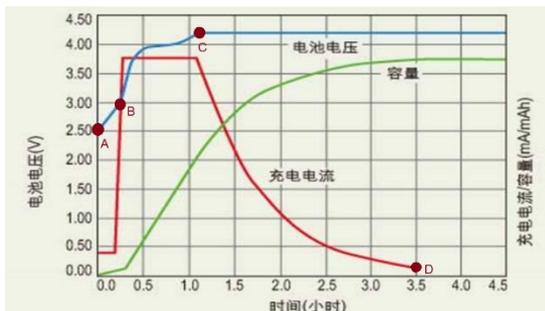


充电保护: 随着充电的进行, 电芯的电压不断上升, 当电压进入高压警戒区时, 开启充电回路开关 T1, 从而切断充电回路。
 充电回路: $P+ \rightarrow B+ \rightarrow B- \rightarrow D2 \rightarrow P-$



放电保护: 随着充电的进行, 电芯的电压不断下降, 当进入低压警戒区时及时打开充电回路开关 T2, 切断充电回路。
 放电回路: $B+ \rightarrow P+ \rightarrow P- \rightarrow D1 \rightarrow B-$

电池充电过程中电压、电流、电量关系如下所示:



- A 点:** 电池电压处于低压警戒区, 允许预充电流充电;
- B 点:** 电池电压恢复到正常区间, 大电流的快速充电, 恒流 CC;
- C 点:** 电池的端电压达到电压限值, 进入恒压 CV 充电区;
- D 点:** CV 充电阶段, 充电电流逐渐减小, 达到某电流时截至。

上图为大家呈现了电池充电的详细过程，但电池充/放电还有以下注意事项：

在充电的过程中，Li⁺从正极 LiCoO₂ 中脱出，进入电解液，在充电器附加的外电场作用下向负极移动，依次进入石墨或焦炭 C 组成的负极，在那儿形成 LiC 化合物。

- ✓ 如果**充电速度过快（充电电流过大）**，会使得 Li⁺来不及进入负极栅格，在负极附近的电解液中就会聚集 Li⁺，这些靠近碳 C 负极的 Li⁺很可能从负极俘获一个电子成为金属 Li。持续的金属锂生成会在负极附近堆积、长大成树枝状的晶体，俗称枝晶。
- ✓ 随着负极的充满程度越高，LiC 晶格留下的空格越少，从正极移动过来的 Li⁺找到空格的机会就困难，时间就越长。如果充电速度不变的话，一样可能在负极表面形成局部的 Li⁺堆积。因此，在**充电的后半段必须逐步缩小充电电流**。

枝晶的长大会刺破正、负极之间的隔膜，形成短路。

可以想象：

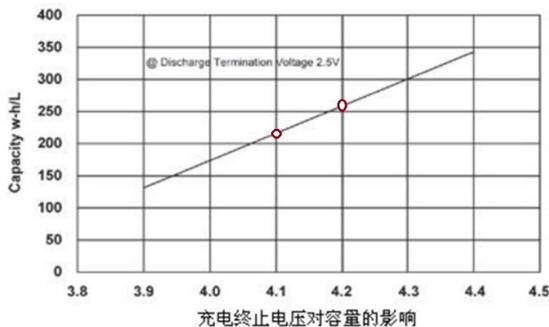
- ✓ **充电的速度越快越危险**，（如瞬时 5C，平均 1.2C）；
- ✓ **充电终止的电压越高也就越危险**（电压控制在高压警戒区）；
- ✓ **充电的时间越长越危险**，（如充电电流小于 0.1C 截至）。

因此，对电池的充电控制和管理尤为重要。

1.3 锂电池的容量和寿命与充电截至电压的关系

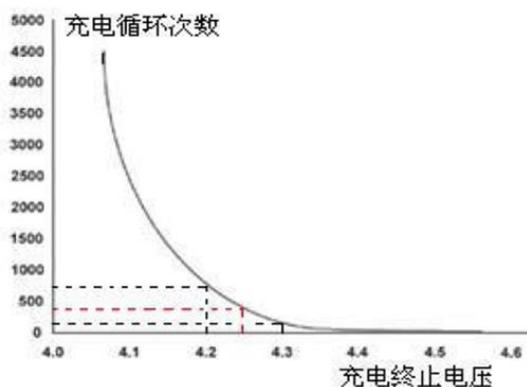
为了锂电池的使用安全，电池的充电终止电压不能高于警戒区。

在安全电压以内，该如何决定电池的终止电压呢？



如果充电截至电压 4.1V，电量约 210；4.2V 时约 260；
电压增加 $0.1V/4.2V = 2.4\%$ ；电量变化 $50/260 = 19.2\%$

- ✓ 相当于电压增加或减小 1%，容量相应的变化 8%。
为获得尽可能多的电量，在安全的前提下，截至电压越高越好。



从图中可以看出：

- ✓ 充电终止电压越高，电池寿命就越短；
- ✓ 4.2V 是寿命曲线函数的变化速率拐点；
- ✓ 在 4.2V 附近，0.05V 电压误差会导致寿命变化约 1/3；
- ✓ 充电终止电压 4.3V 时，锂电池寿命仅仅 150 次。

为获得更长的循环使用寿命，截至电压越低越好。

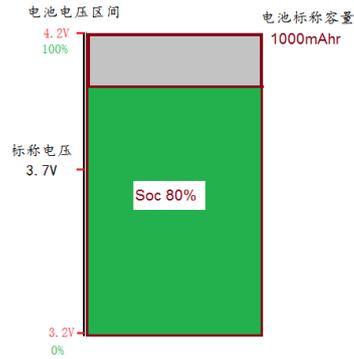
从以上电池容量和循环充放电寿命测试结果可以看出：

电池的充电终止电压高，电池充电容量大，但电池寿命短；反之，电池终止电压低，电池充电容量小，但电池可充放电次数多。

电池充电终止电压需要在容量和循环寿命之间进行折衷，且电压控制精度要求高。

1.4 锂电池的重要参数

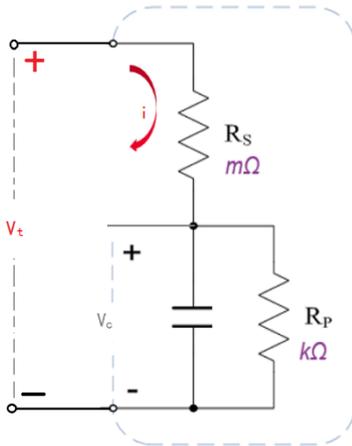
锂电池的基本参数：



- 标称电压 —— 电池的电压等级，如手机电池标称 3.7V，电池工作区间 约 3.2V- 4.2V，如某电动自行车标称 48V 电池，约 13 个 3.7V 电池串联，电压区间约 41.6V-54.6V。
- 电池的电容 —— 电池的电量，单位 AHr、mAh、Whr，如 1000mAh；

其他重要锂电池

- 电池的内阻** —— 电池内部等效电阻，通常也称为电池交流内阻 (ACR)，或电池直流内阻 (DCR)；



如右图：外部充电正，负极端子上量测的电压 $V_t = V_c + R_s * I$ (I 有方向)

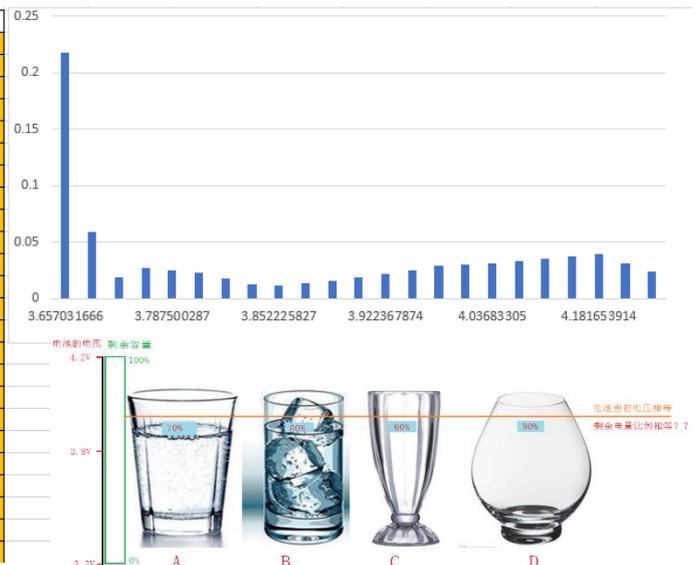
- ✓ 充电时，电流流入电池， V_t (电池端电压) $>$ V_c (电池开路电压)
- ✓ 放电时，电流流出电池， V_t (电池端电压) $<$ V_c (电池开路电压)

下图为某电池实测结果：开路 (不充放电) 电压 3.79V，1A 充电时，电压 3.95V；-1A 放电时，电压 3.31V。



- 电池循环寿命 —— 电池循环充、放电若干次后，容量衰减到一定比率 (如 60%) 对应测次数；
- 电池放电倍率 —— 电池循环寿命不明显变化是对应的放电电流，峰值，均值；
- 内阻、容量分布随电压** —— 单位容量在电压区间的分布

DCR (ohm)	Voc (V)	V.Diff	Capacity (%)
0.026973467	3.439683182		0.0
0.026404381	3.657031666	0.217348484	4.3
0.027300577	3.715984956	0.05895329	8.6
0.028127499	3.734977014	0.018992058	13.0
0.029376952	3.762391339	0.027414325	17.3
0.030164715	3.787500287	0.025108948	21.6
0.030612322	3.810691171	0.023190884	26.1
0.030762719	3.828152746	0.017461574	30.5
0.030622899	3.840507143	0.012354398	34.9
0.030085567	3.852225827	0.011718684	39.2
0.029601442	3.86584736	0.013621533	43.6
0.029172119	3.881852574	0.016005213	47.9
0.028755904	3.900348199	0.018495625	52.3
0.02823026	3.922367874	0.022019675	56.6
0.027860027	3.947557652	0.025189778	61.0
0.027454544	3.976328753	0.028771101	65.3
0.027279973	4.006074014	0.029745261	69.7
0.027063011	4.03683305	0.030759037	74.1
0.027019078	4.070077821	0.033244771	78.4
0.027011747	4.105446137	0.035368316	82.8
0.027203013	4.142569867	0.03712373	87.1
0.027314364	4.181653914	0.039084047	91.5
0.027608565	4.212539878	0.030885964	95.7
0.02849117	4.236150871	0.023610993	100.0

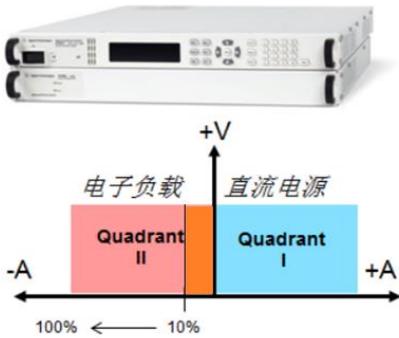


- 电池自放电 —— 因电池内部等效并联电阻 R_p 引起电量变化的速度，单位 μA 。

二、APS 硬件 + Test Flow 软件电池方案

2.1 APS 先进电源系统硬件平台

2.1.1 N7900A/N6900A 先进电源系统 – 1/2KW、160V、200A



采用 VersaPower 技术，一台电源实现系统级功能：

- ✓ 无缝的电源和负载功能转换；
- ✓ 高达 18bit,200KHz 电压、电流和功率实时采样
- ✓ 大功率的电压或电流任意波形功能
- ✓ 小于 0.5ms 的电压编程速度
- ✓ 内置高达 100A 的输出短路开关
- ✓ 高达积分时间 5us 的电量计
- ✓ 0.01%级别的电压和电流测量精度

型号和配置：

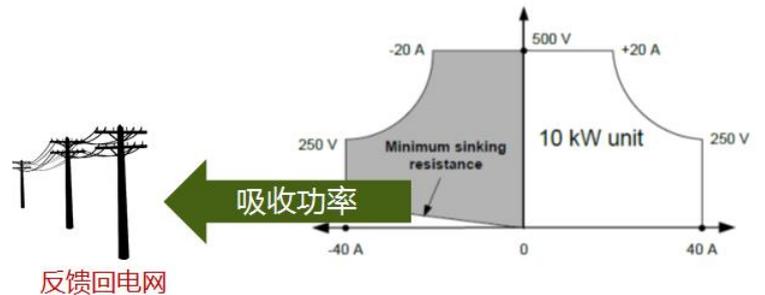
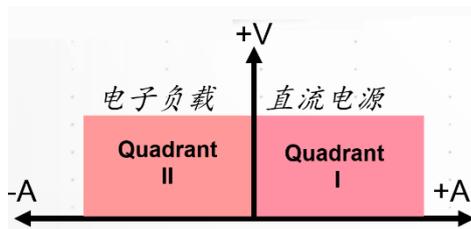
N6900 / N7900 型号	电压，电流 和功率范围
N6950A/ N7950A	9 V, 100 A, 1000 W
N6951A/N7951A	20 V, 50 A, 1000 W
N6952A/N7952A	40 V, 25 A, 1000 W
N6953A/N7953A	60 V, 16.7 A, 1000 W
N6954A/N7954A	80 V, 12.5 A, 1000 W
N6970A/M7970A	9 V, 200 A, 2000 W
N6971A/N7971A	20 V, 100 A, 2000 W
N6972A/N7972A	40 V, 50 A, 2000 W
N6973A/N7973A	60 V, 33 A, 2000 W
N6974A/N7974A	80 V, 25 A, 2000 W
N6976A/N7976A	120 V, 16.7 A, 2000 W
N6977A/N7977A	160 V, 12.5 A, 2000 W
N7909A	1000 W 功耗耗散器，扩展主机吸收电流
BV0003B	BenchVue Power Supply App 软件
R-D5B-004-D	Transportable license

2.1.2 RP7900A 回馈式先进电源系统 – 5/10kW、950V、800A



与上述 N7900 相同平台，高功率型号；采用**回馈电网**设计，即 RP7900 在吸收功率时，将吸收的电能返回电网。

此外，RP7900 采用**自动量程**功率设计，覆盖更宽电



型号和配置：

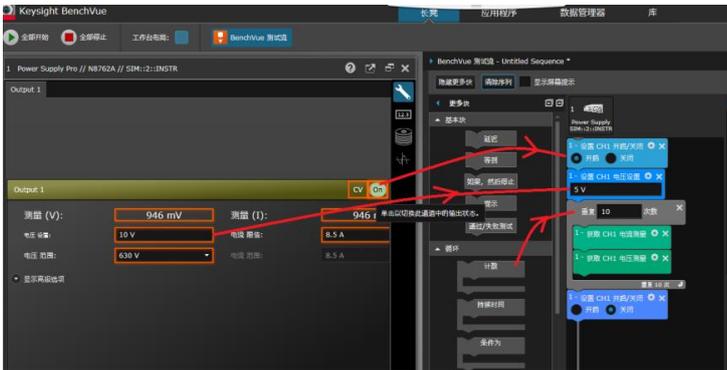
型号	电压	电流	功率
RP7961A	500V	±20A	5kW
RP7962A	500V	±40A	10kW
RP7963A	950V	±20A	10kW
RP7941A	20V	±400A	5kW
RP7942A	80V	±125A	5kW
RP7943A	20V	±800A	10kW
RP7945A	80V	±250A	10kW
RP7946A	160V	±125A	10kW

2.2 Test Flow 软件平台

BenchVue 软件通过简化仪器的连接和控制，让工程师更灵活、快捷的获得测量结果。软件通过 APP 方式，支持 Keysight 从电源、万用表、示波器、网络分析仪、信号源、频谱仪等全系列仪器，实现虚拟面板控制。



Test Flow (测试流) 应用软件通过拖拽方式将各仪表的控制参数按照次序编辑测试流程，以完成产品需要的测试功能，并获得相关测试数据（导出至 Excel）。与其他高级编程语言 VC, VB, C#等相比，工程师无需任何语言基础，就能够完成复杂的测试任务，提升测试效率，缩短研发和测试时间。



Time	Step	Voltage Set	Current Set	Current Measurement	Measurement Value	Power Measurement	Measurement Value
31:52.9	1	5	0.5	0.01	0.419434869	0	-0.113321266
31:53.9	2	9	1	0.11	0.67353252	0	-0.287302084
31:53.7	3	5	1.5	0.15421156	1.12224126	0	-0.577431502
31:54.1	4	5	2	0.181205081	0.181700137	0	0.307033977
31:54.6	5	12	0.5	0.21	1.432110438	0	-0.076102139
31:55.0	6	12	1	0.234866798	1.480052212	0	0.430512416
31:55.5	7	12	1.5	0.254948974	0.519828276	0	0.323179252
31:55.9	8	12	2	0.274575131	0.96770005	0	0.047016449
31:56.5	9	18	0.5	0.29242712	0.96210511	0	-0.345051481
31:56.9	10	18	1	0.31	0.631280759	0	-0.174719194
31:57.3	11	18	1.5	0.326227766	0.276574006	0	-0.18580043
31:57.8	12	18	2	0.34462479	1.31950016	0	-0.32230314

用户无需编程（经验）即可：

- 连接仪器
- 编辑测试序列
- 记录数据
- 获取测量结果

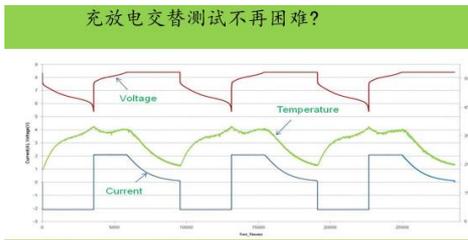
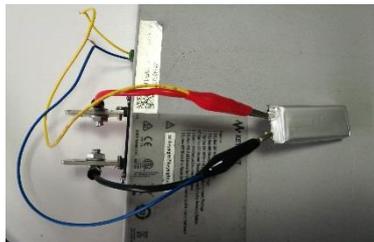
所见即所得
拖拽式操作
操作简单
自动生成测试数据

BenchVue可视作仪器与上位机的神经网络



2.3 电池测试系统 (BTS)

只需将电池的正、负极 与 APS 电源的输出端相连，即可完成电池的放电、充电及循环等参数测量。



- ✓ +/--电流能力，单次连接完成充电和放电测试。
- ✓ 内置电量测试能力，直接获得当前电量(AHr)。
- ✓ 高精度测量，可以用于测量电池的内阻 DCR。
- ✓ 输出端继电器开关，完全断开与电池的连接。

2.3.1 Test Flow 测试流序列

基于 N7900 APS 电源系统硬件，电池放电、充电测试序列如下图所示：

放电 --> 充电 静置 时间

放电测试

- 1- *RST (Address: GPIB0::5::INSTR)
- 1- Set CH1 Priority Mode (Current)
- 1- Set CH1 Voltage Limit (4.25 V)
- Repeat: 100 time(s)
- 1- Set CH1 On/Off (On)
- 1- Amper Hour Reset (Address: GPIB0::5::INSTR, N7951A, SCPI: SENS:AHO:RES)
- 1- Set CH1 Current Setting (Curr_Dischrg)
- Repeat Until (Get CH1 Voltage Measurement <= 3.5 V, @Timeout @Count)
- 1- Get CH1 Voltage Measurement
- 1- Get CH1 Current Measurement (获取 电池电压、电流 和 电量)
- Set (1- Amper Hour Reset, Address: GPIB0::5::INSTR, N7951A, SCPI: FETC:AHO?, Return Type: Double)
- Delay 5 s

充电测试

- Delay 60 s
- 1- Set CH1 On/Off (Off)
- 1- Set CH1 Current Setting (Curr_Chrg)
- 1- Amper Hour Reset (Address: GPIB0::5::INSTR, N7951A, SCPI: SENS:AHO:RES)
- Repeat Until (Get CH1 Current Measurement <= 200 mA, @Timeout @Count)
- 1- Get CH1 Voltage Measurement
- 1- Get CH1 Current Measurement (获取 电池电压、电流 和 电量)
- Set (1- Amper Hour Reset, Address: GPIB0::5::INSTR, N7951A, SCPI: FETC:AHO?, Return Type: Double)
- Delay 5 s
- Export Data (File Name: Battery-Dischrg - Chrg - 14, Export Target: CSV, Export Path: C:\0 D盘-工作文件\Work SPD\Baohua...)
- Delay 60 s
- repeat: 100 times

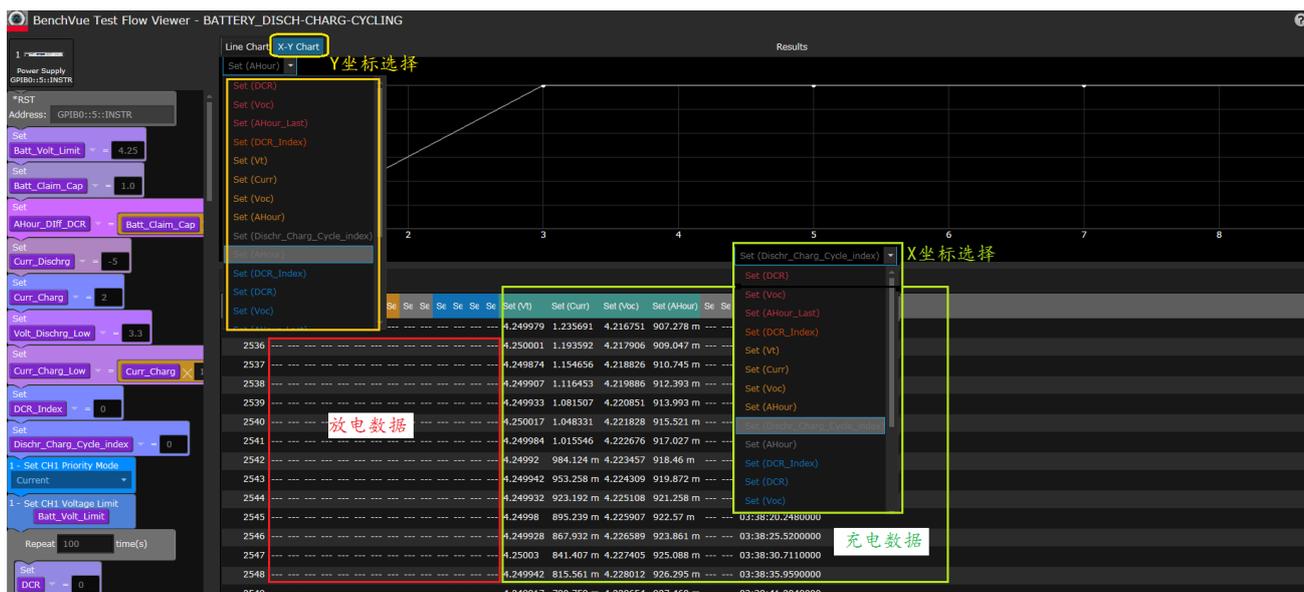
通过修改循环次数， 电池电压、放电电流、放电截至电压； 充电电流、充电截至电流等参数即可实现相应规格电池的测量。

2.3.2 电池放电、充电数据和分析

2.3.2.1 数据在 BenchVue 软件分析

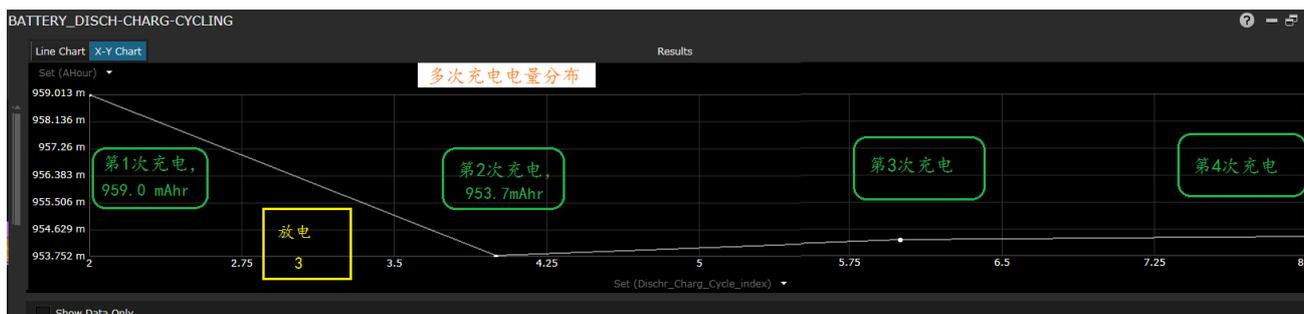
在 BenchVue 软件上，可以通过 X-Y 坐标分析各种数据图表，可选的 X-Y 参数取决于 Test Flow 软件中测试序列输出数据。

本案例 Test Flow 中可选择电池端电压 V_t ，电池开路电压 V_{oc} ，电池电量 A_{Hour} ，直流内阻 DCR ， DCR 测试指示 (DCR_Index)，电量测量指示 ($Dischrg_Chrg_Cycle_Index$) 等。

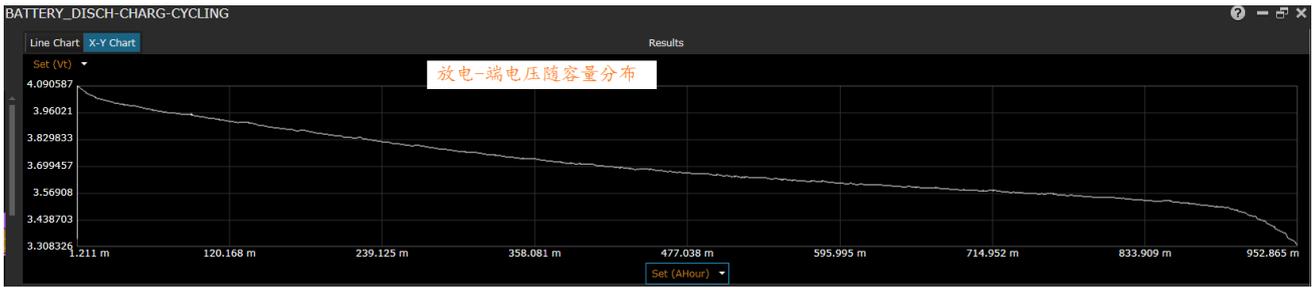


以下列举某些 X-Y 分析数据：

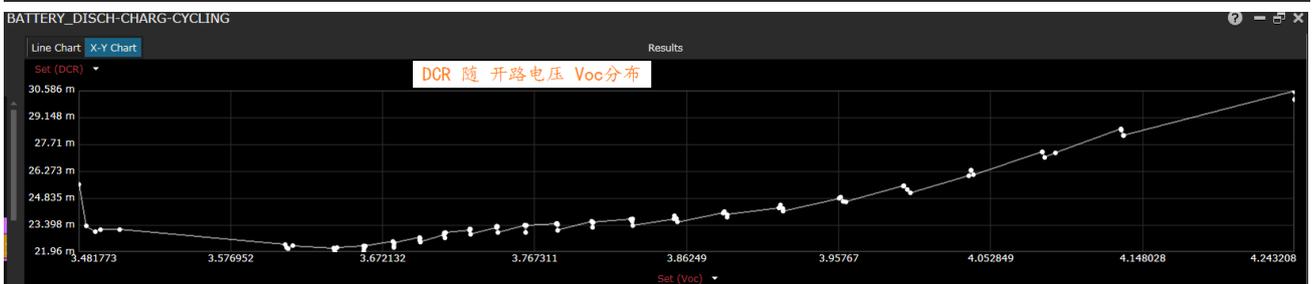
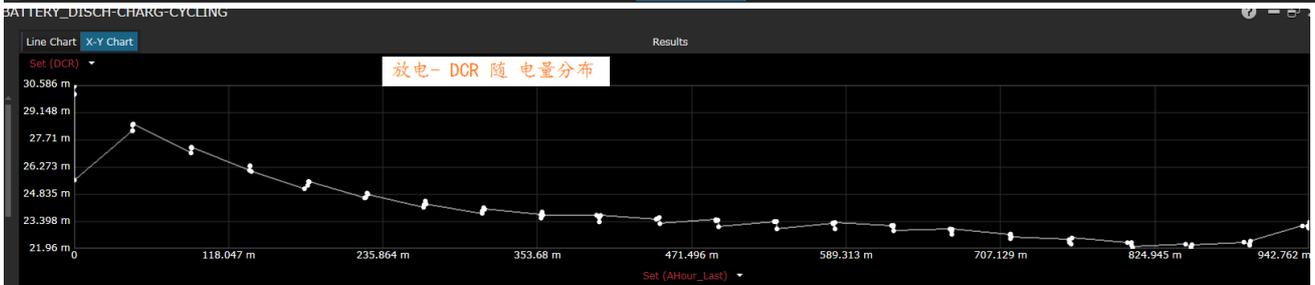
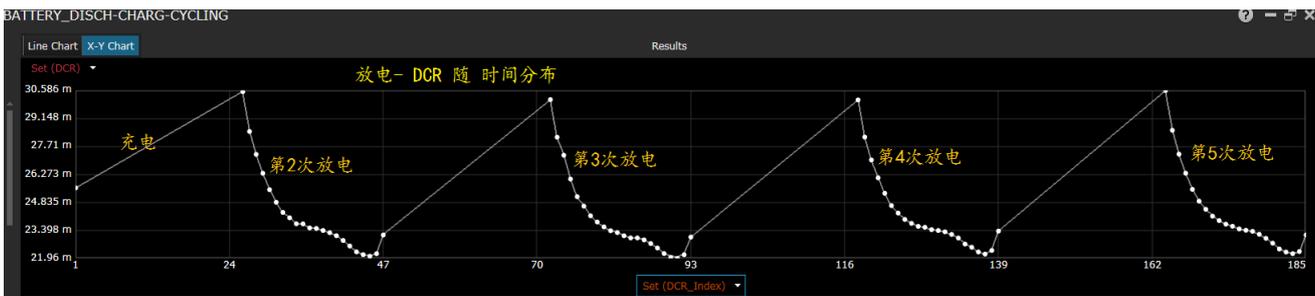
A、循环放电、充电容量 (Ahr) 和 测试次序 (n) 分布



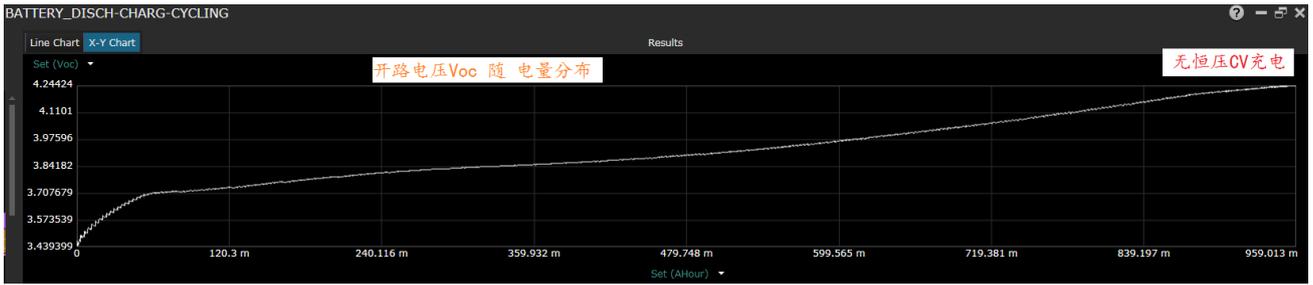
B、端电压 (Vt) 随 电量 (Ahr) 分布



C、直流内阻 (DCR) 随 电量 (Ahr) 分布



D、开路电压 (Voc) 随 电量 (Ahr) 分布



E、充电电流 随 电池开路电压 Voc 分布



F、充电电流 随 电池电量分布



G、电池端电压 Vt 随 开路电压 Voc 分布



以充电数据区为例：依次为 DCR 测量数据； 电池实时数据； 循环测量数据。

Charging									
Set (DCR_Index)	Set (DCR)	Set (Voc)	Set (AHour_Last)	Set (Vt)	Set (Curr)	Set (Voc)	Set (AHour)	Set (Dischr_Set (AHour))	
				4.240117	2.000479	4.183849967	0.1699255		
				4.243302	2.000372	4.187037977	0.1728074		
				4.246304	2.000376	4.190039864	0.1756881		
				4.249229	2.000648	4.192957214	0.1785524		
				4.249927	1.927909	4.195701128	0.1813995		
				4.249949	1.848989	4.197942893	0.1841576		
				4.250004	1.781193	4.199940776	0.186772		
				4.250028	1.718884	4.201681328	0.1892917		
				4.249983	1.660764	4.203271056	0.1917221		
				4.249961	1.606179	4.204784357	0.1940794		
				4.249909	1.553527	4.206213288	0.196357		
				4.24999	1.502312	4.207734801	0.1985567		
				4.249954	1.453893	4.209060671	0.2006834		
				4.249969	1.406921	4.210396843	0.2027518		
				实时 电压, 电流, 开路电压, 电量					
				4.250011	1.325097	4.212699707	0.2070612		
				4.24998	1.274649	4.214089191	0.2089584		
				4.250036	1.230624	4.215384821	0.2107688		
				4.249979	1.188887	4.216503027	0.2125469		
				4.249928	1.149887	4.217550166	0.2142484		
				4.249945	1.113993	4.218577847	0.2158887		
				4.249967	1.078446	4.219600759	0.2174812		
				4.250027	1.044372	4.220620194	0.2190295		
				4.250003	1.01161	4.221518687	0.2205058		
21	0.028157405	4.210419008	0.2047659					4 0.2205058	

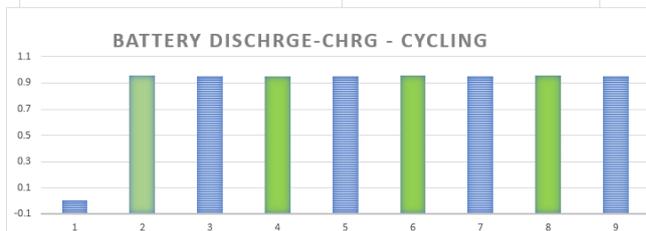
利用 Excel 的数据排序，可进行测量数据分析：

A、循环放电、充电容量 (Ahr) 和 测试次序 (n) 分布

放电、充电循环的测试数据分布在第 N/O 列 (放电) 和 X/Y 列 (充电)，通过 Excel 的数据排序功能，分别针对 N 和 X 列排序即可获得 各次 电量值。

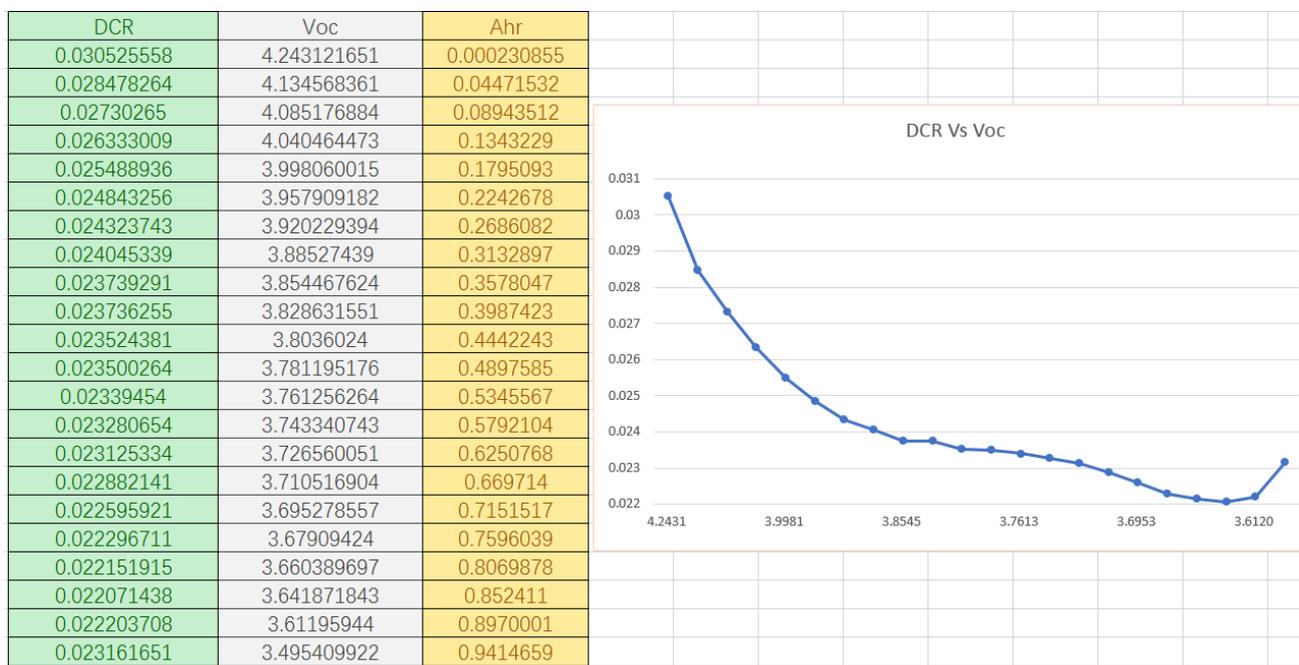
将数据复制到另一张 Excel 表格，并利用 Excel 的数据图表功能，可获得下图所示电流分布数据：

Set (Dischr_Charg_Cycle_index)	Set (AHour)
1	0.001211069
2	0.9590132
3	0.9497363
4	0.9537523
5	0.9503627
6	0.9542792
7	0.9509925
8	0.9544028
9	0.9528654



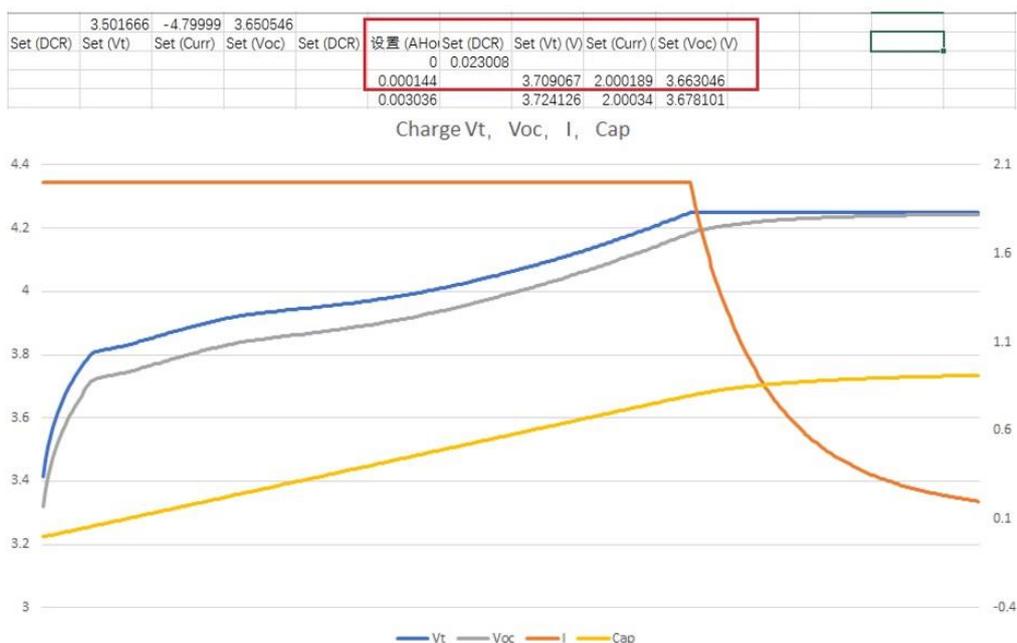
B、直流内阻 DCR 随 电池电量 / 开路电压 Voc 分布

分别对第 F 列（放电）和第 P 列（充电）进行排序，可获得直流内阻 DCR/开路电压 Voc/电量 Ahr 的数据分布。下图为一个放电周期内的 DCR 数值分布 和 对应曲线。



C、电池充电过程 Vt-Voc-Ichrg-Ahr 分布

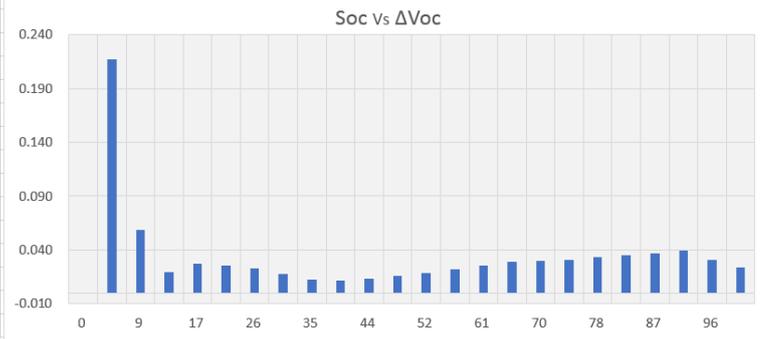
电池单次充电过程中的充电电流，端电压 Vt，开路电压 Voc，电量 Ahr 分布曲线。



D、电池充电过程 Vt-Voc-Ichrg-Ahr 分布

如下图表所示，每 4.28% SOC（40mAh）对应的电压区间分布。

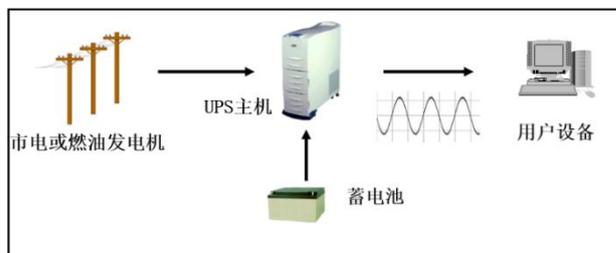
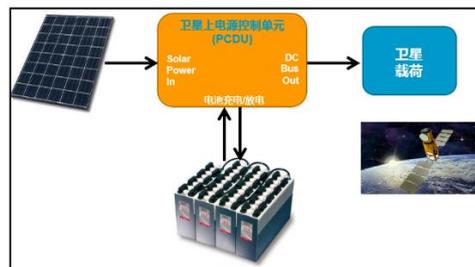
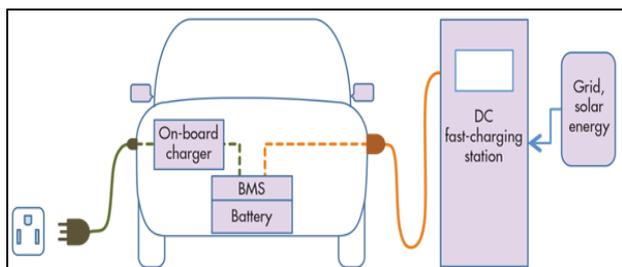
DCR	Voc	Ahr	Soc	Δ Voc
0.027	3.440	0.000	0.000	0.000
0.026	3.657	0.040	4.279	0.217
0.027	3.716	0.081	8.605	0.059
0.028	3.735	0.123	12.983	0.019
0.029	3.762	0.163	17.298	0.027
0.030	3.788	0.204	21.643	0.025
0.031	3.811	0.246	26.065	0.023
0.031	3.828	0.288	30.511	0.017
0.031	3.841	0.330	34.895	0.012
0.030	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



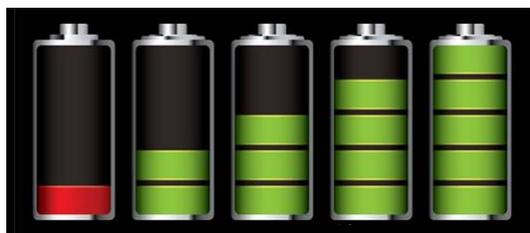
2.4 电池模拟器 (BSS)

2.4.1 电池模拟器 (BSS) 概要

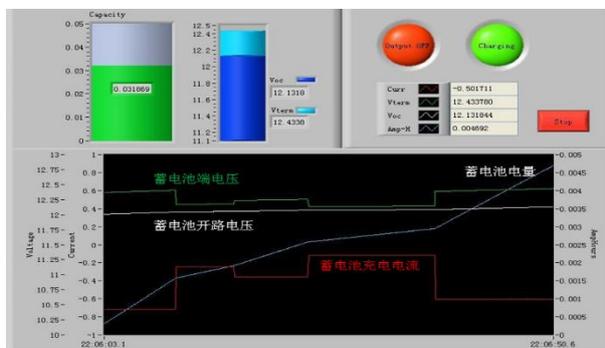
新能源汽车、光伏储能、航空航天、无人机等领域，电池的安全、寿命和充、放电性能非常关键。如何测试和验证电池的管理(BMS)和控制单元(PCDU)，就必须遍历电池各种状态下——如电池处于低压、高压、过流等的处理？



真实的电池、特别是大容量的电池，为了让电池从高压切换到低压，或者从低压切换到高压，必须对其进行完整的充、放电过程，需要花费大量的等待时间。



真实的电池在进行过压、欠压、过流、高温等测试时，尚未确保工作性能的电池管理电路，可能会导致电池使用的安全隐患和危险。



- ✓ 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

电池模拟器 (BSS) 就是针对上述真实电池存在的不足 而设计的特殊电源系统。该系统可用于模拟电池的充、放电特性；电池端电压随电池充、放电过程的变化；任意的初始工作电压、容量设置；任意容量、电压的电池模拟；无过压、过流甚至短路导致的电池爆炸、泄漏等安全隐患。

2.4.2 Test Flow 软件中的电池模拟器（BSS）序列

以下通过 Test Flow 软件控制 N7900 APS 先进电源系统，配合上述 BTS 测量电池模型序列和验证结果。该案例中使用了电池 100% Soc, 52.9%, 0% 三个电池参数点（可扩展至更多 Soc 参数）。
 电池模型在 Test Flow 软件序列中的设定：

The screenshot displays the configuration for the battery model in Test Flow. On the left, several 'Set' blocks are visible, including 'Battery Current + Limit' (Curr_High_Limit = -5), 'Battery Current - Limit' (Curr_Low_Limit = -5), 'Battery Capacity (Ahr)' (Cap_Claim = 0.3), and 'Initial Battery Soc %' (Init_Soc_% = 0.9). Annotations in Chinese identify these as: '电池电流限值, +5A', '电池限流值, -5A', '标称电池容量', and '初始电池Soc (%)'. The right side shows a table titled '电池模型' (Battery Model) with columns for DCR, Voc, and Soc. The table lists 20 rows of data, with the first row (0.027, 3.440, 0.000) highlighted in red, and the last row (0.028, 4.236, 100.000) also highlighted in red. Below the table, three 'Set' blocks for 'Battery Model Para- Cap' are shown, with values for Cap_[20], Cap_[10], and Cap_[0] set to 1, 529 m, and 0 respectively, corresponding to Soc = 100%, Soc = 52.9%, and Soc = 0%.

DCR	Voc	Soc
0.027	3.440	0.000
0.026	3.657	4.279
0.027	3.716	8.605
0.028	3.735	12.983
0.029	3.762	17.298
0.030	3.788	21.643
0.031	3.811	26.065
0.031	3.828	30.511
0.031	3.841	34.895
0.030	3.852	39.247
0.030	3.866	43.597
0.029	3.882	47.950
0.029	3.900	52.295
0.028	3.922	56.644
0.028	3.948	60.990
0.027	3.976	65.336
0.027	4.006	69.703
0.027	4.037	74.050
0.027	4.070	78.412
0.027	4.105	82.768
0.027	4.143	87.121
0.027	4.182	91.462
0.028	4.213	95.710
0.028	4.236	100.000

电池实时更新序列：

The screenshot shows the real-time update sequence for the battery simulator. It features a 'Repeat Forever' loop containing several steps: 'Set LoopCnt = 0', 'If conditions met' (Cap_Now <= Cap_[10] and Cap_Now >= Cap_[0]), 'Then' block with calculations for 'Slew_Voc-Ahr', 'Voc_Now', and 'DCR_Now', and 'Set DCR_Now = DCR-[10]'. The right side shows a 'LoopCnt' block, a 'Set SCPI Command: RES DCR[n]', a 'Concatenate' block for 'DCR_CmdString', a 'Set DCR Value' block, and a sequence of '1 - Set Voc Adjust Voltage (Voc)', '1 - Read Vt Measure Voltage (V)', '1 - Read I Measure current (A)', 'Set Show DCR Now', and 'Set DCR_Now = DCR_Now'. A 'Set Cap_Now = Init_Cap_Ahr' block is also present. Annotations in Chinese describe the process: '电池模拟器 BSS 主循环 分支', '依据 Ahr 区间, 选择 Soc - 电压调整斜率 和 DCR值', and '实时获取当前的 电压Vt; 电流I; 电阻DCR; 容量Ahr'. A 'Delay 1 s' block is at the bottom.

2.4.3 Test Flow 软件中的电池模拟器 (BSS) 实时监控数据

使用另外一台双向电源，对电池模拟器 (BSS) 进行实时充电、放电，并通过 BenchVue 软件上监测 BSS 的状态，包括实时电压 V_t ，当前容量 (Ahr) 和电池内阻：

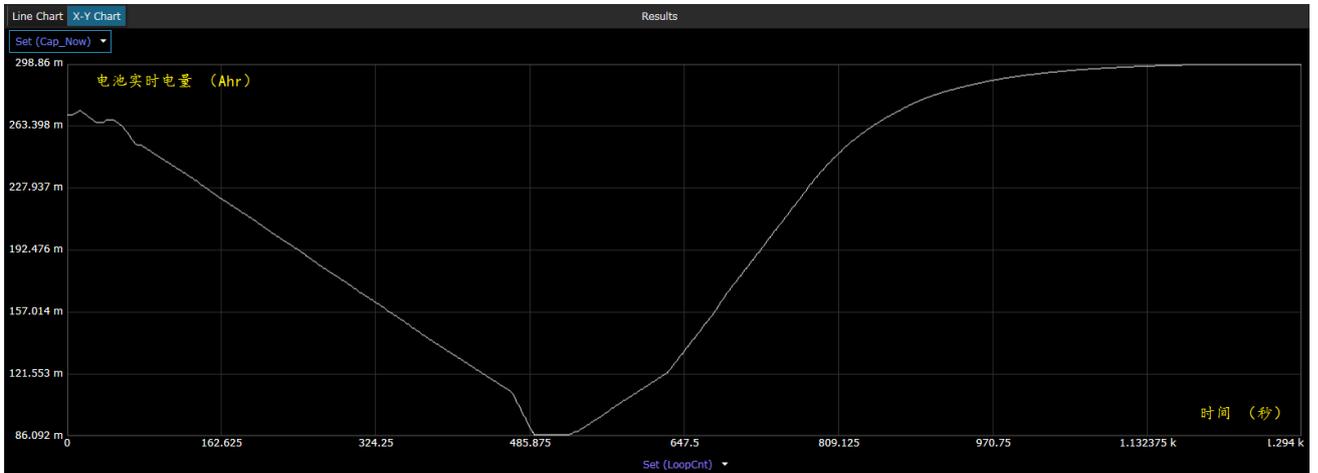


图 1 - BSS 在外部充电、放电时，实时电量的变化趋势

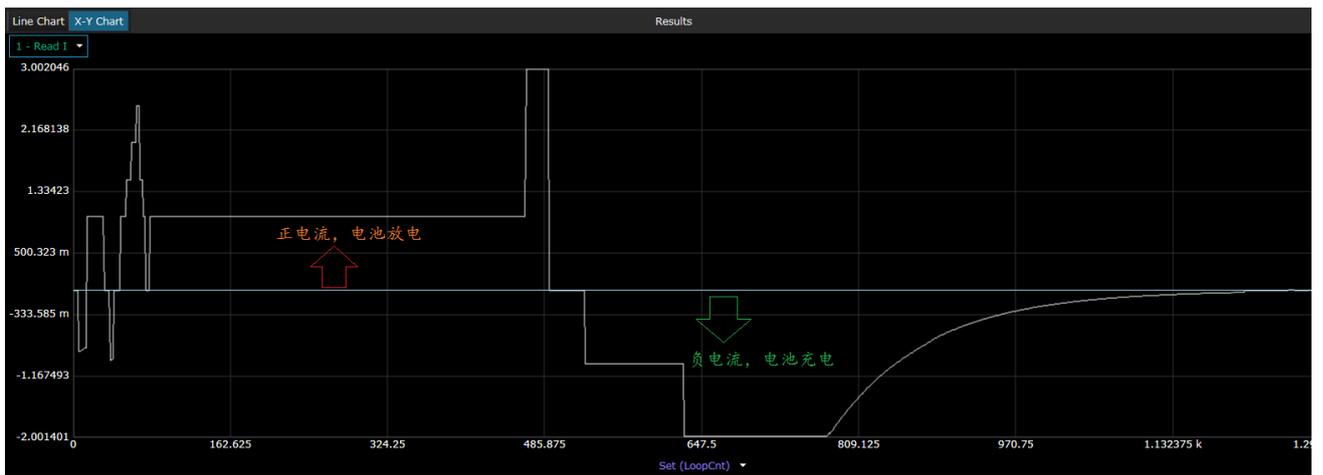


图 2 - 外部双向电源 对电流控制的变化

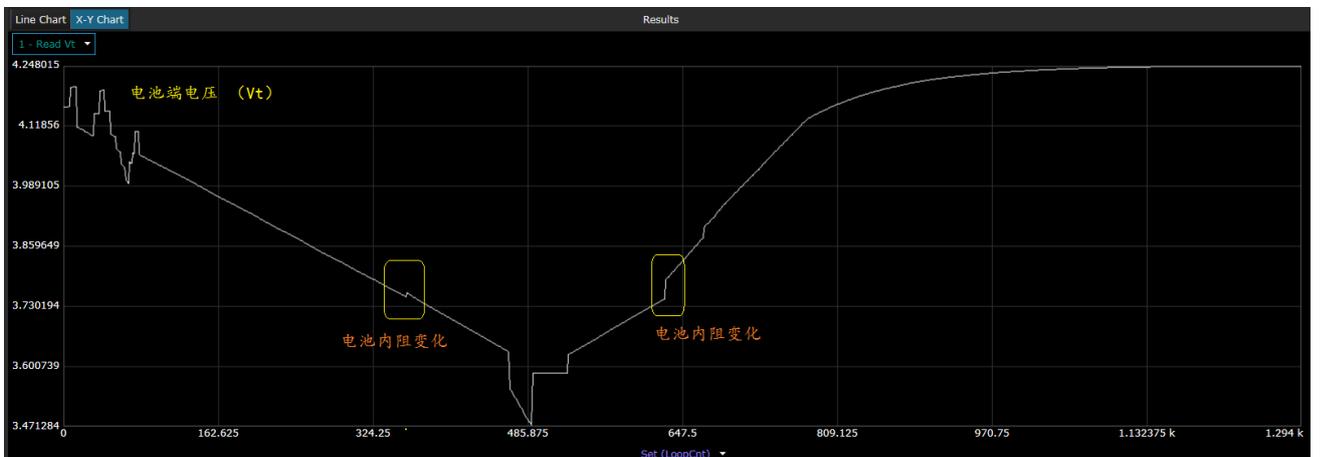


图 3 - BSS 在外部充电、放电时，实时电压的变化趋势

BSS 上监测到的数据导出到 Excel 后，分析数据：

