

电池电量监测基础知识



什么是电池电量监测技术？

- 电池电量监测是一种用于在所有的系统运行及空闲情况下预测电池容量的技术。
- 电池容量
 - 百分比
 - 至电量耗尽/充满的时间
 - 毫安时(mAh)
 - 瓦时 (Wh)
 - 通话时间、闲置时间，等
- 可获得用于反映电池健康状况及安全诊断的其他数据。
 - 健康状况
 - 满充电容量



73%
运行时间 6:23

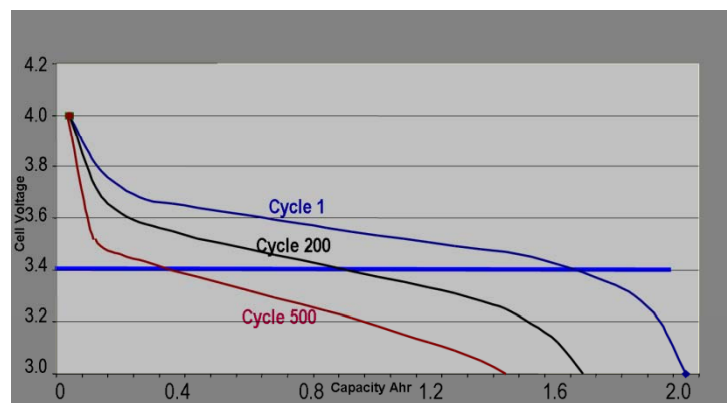
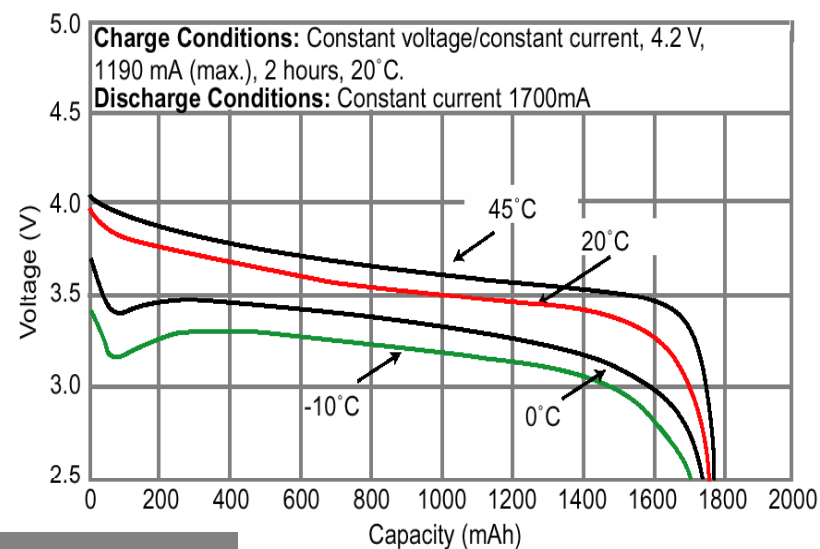
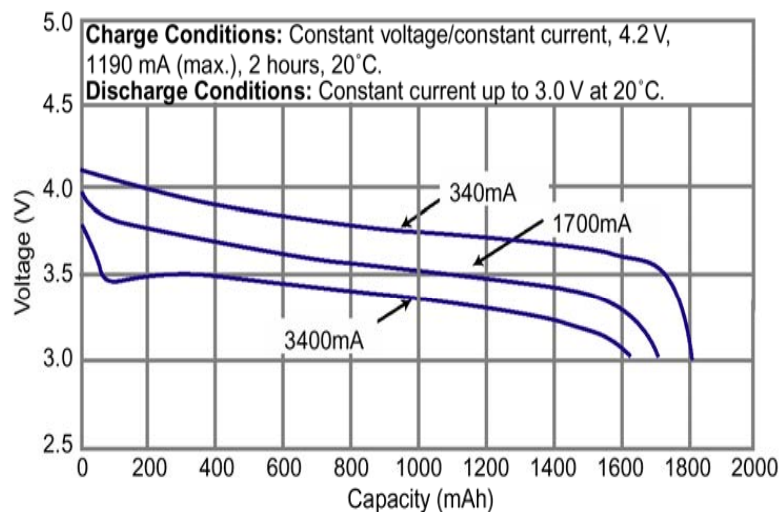
概要

- 电池化学成分基本知识
- 传统的电池电量监测方法
 - 基于电压
 - 库仑计数
- 阻抗跟踪技术及其优势

电池电量监测基础知识

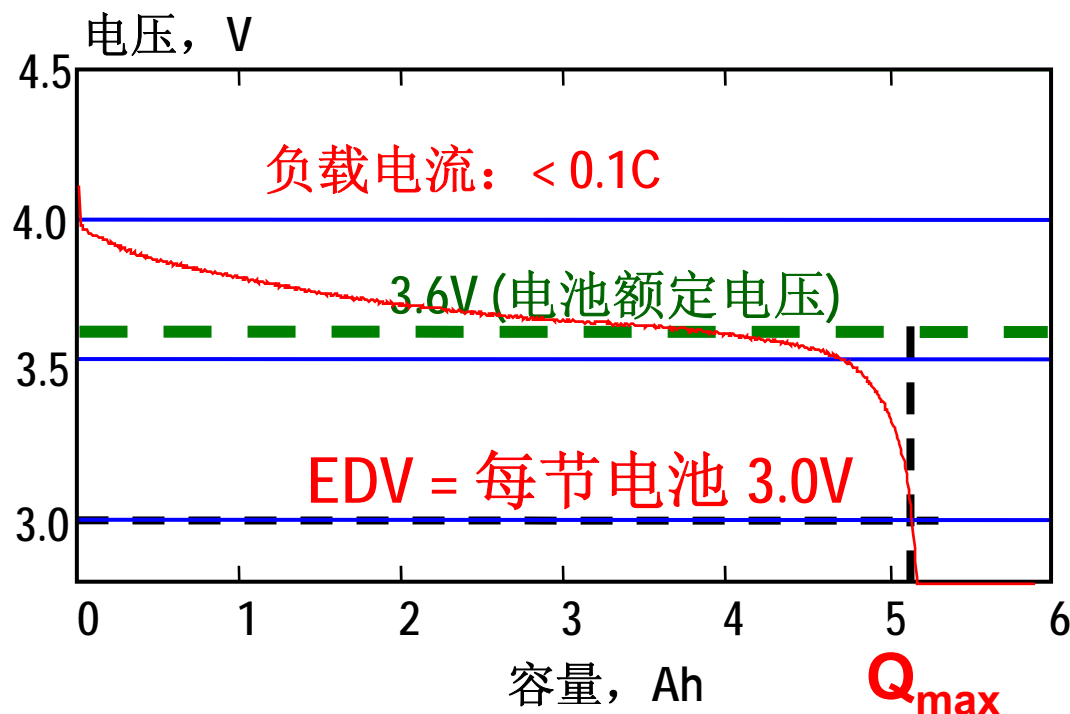
第一部分：电池化学成分基本知识

锂离子电池放电曲线：最优运行时间



随着放电速率、温度和老化情况改变关断电压可提供尽可能长的运行时间

电池化学容量 Q_{max}



电池容量: $1C$

放电速率 $1C$:

在一小时内将一节电池完全放电所需的电流

示例:

2200mAh 电池,

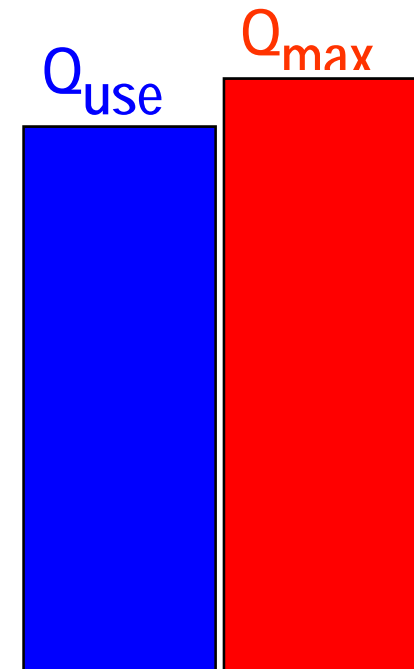
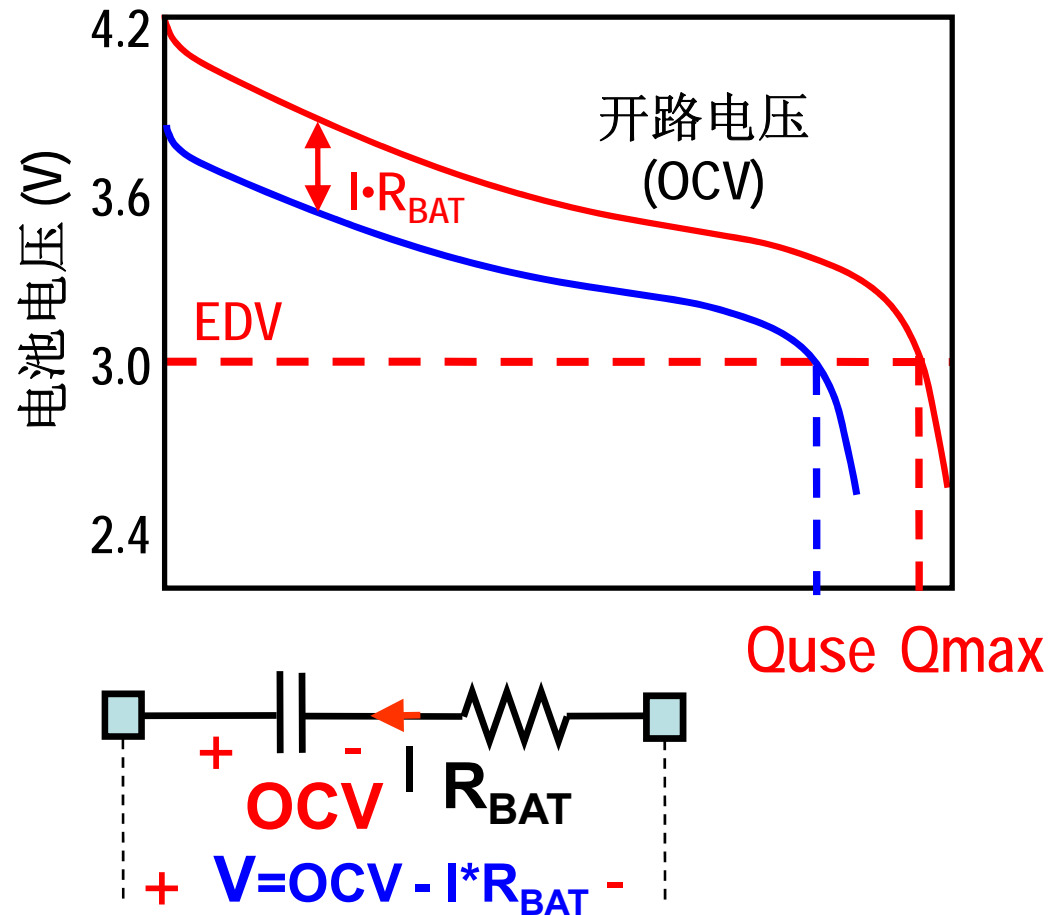
$1C$ 放电速率: 2200mA, 1 小时

$0.5C$ 速率: 1100mA, 2 小时



- 电池容量 (Q_{max}): 在达到放电终止电压 (EDV) 之前可从满充电电池提取的电荷量。
- EDV 是应用或电池化学成分可接受的最小电压。

可用容量 Q_{use}



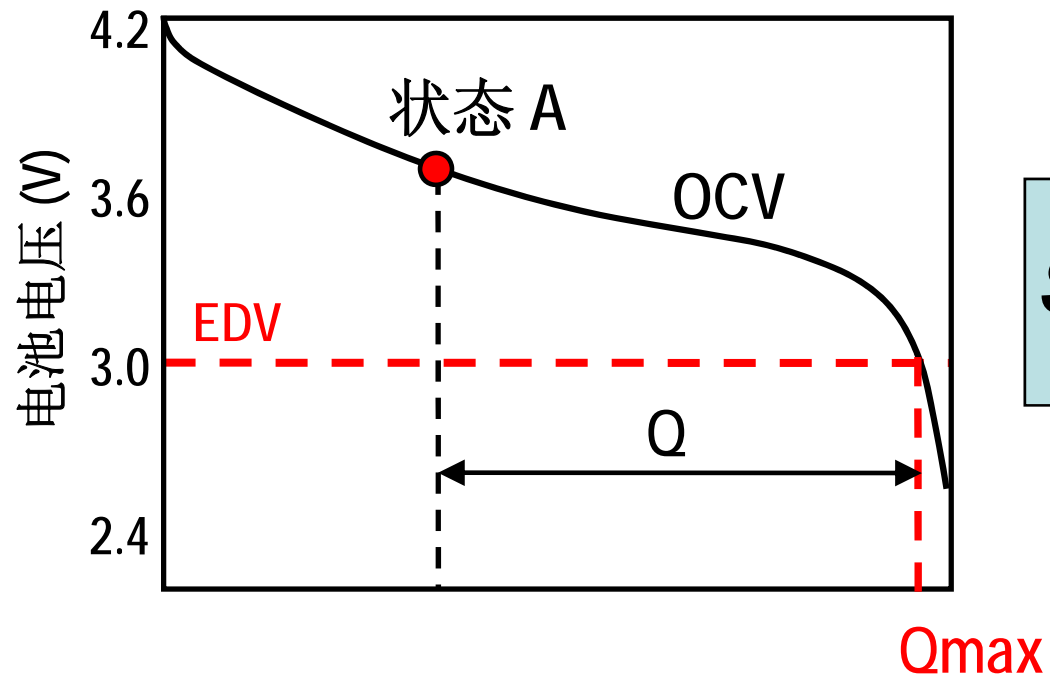
- 放电电流较高时将更早地达到 EDV。
- 可用容量 $Q_{use} < Q_{max}$

电池电阻

$$V = V_{OCV} - I \cdot R_{BAT}?$$

- 阻抗 = f (T, SOC 和老化)
- 电阻在 100 次充放电之后将增加一倍
- 电池之间的电阻偏差为 10-15%
- 不同制造商的电池电阻偏差可达 10-15%

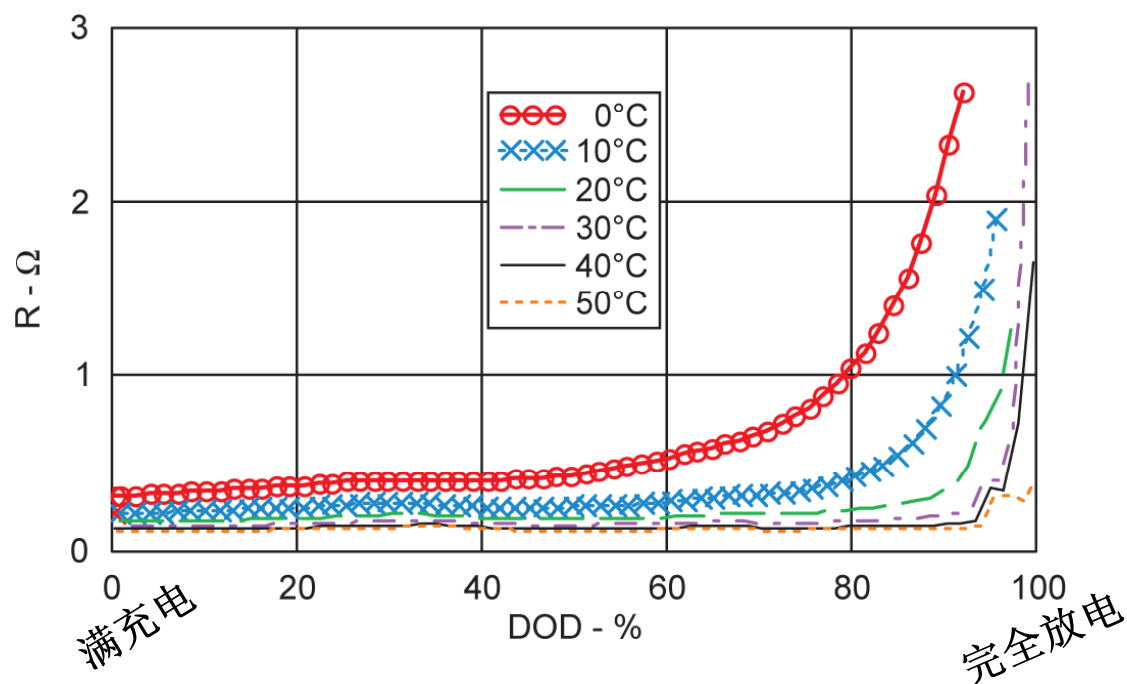
电荷状态 (SOC)



$$SOC = \frac{Q}{Q_{max}}$$

- 对于满充电电池, $SOC = 1$ ($DOD=0$)
- 对于完全放电电池, $SOC = 0$ ($DOD= 1$)

阻抗与温度和 DOD 有关



阻抗在很大程度上取决于温度、电荷状态及老化

$$SOC = \frac{Q}{Q_{max}}$$

DOD = 1 - SOC (电荷状态)

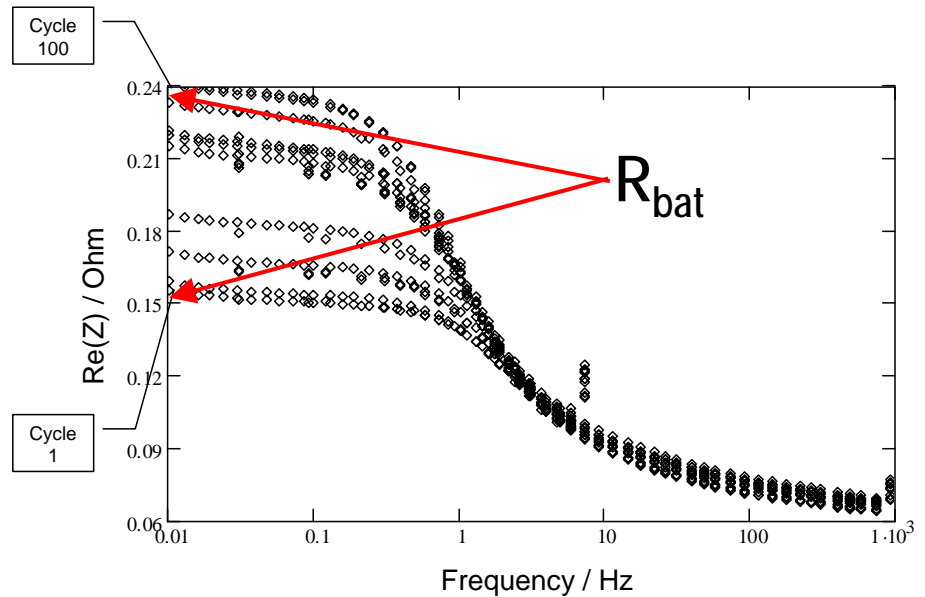
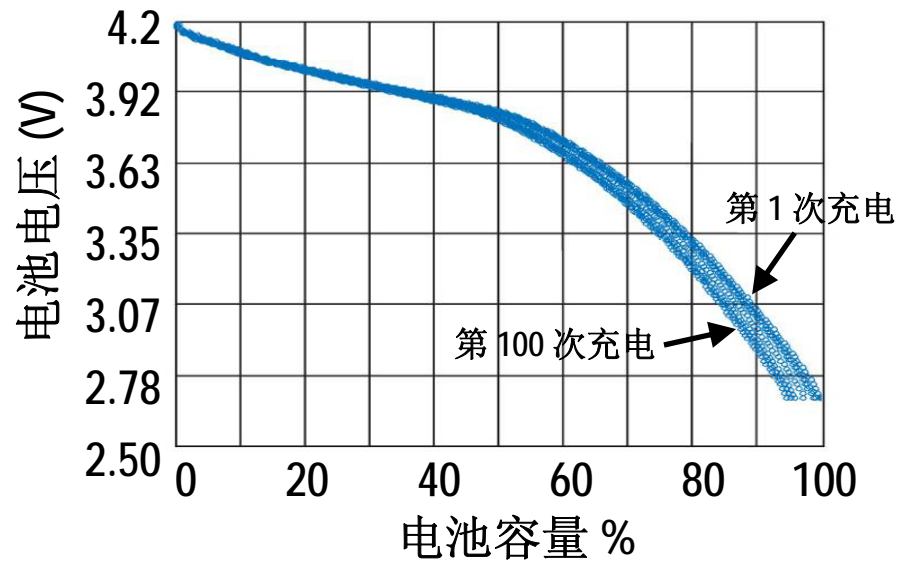
SOC = 1 (满充电电池)

SOC = 0 (完全放电电池)

SOC: 电荷状态

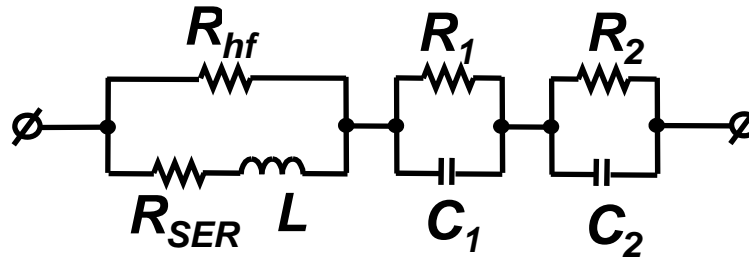
DOD: 放电深度

阻抗和容量随老化而改变

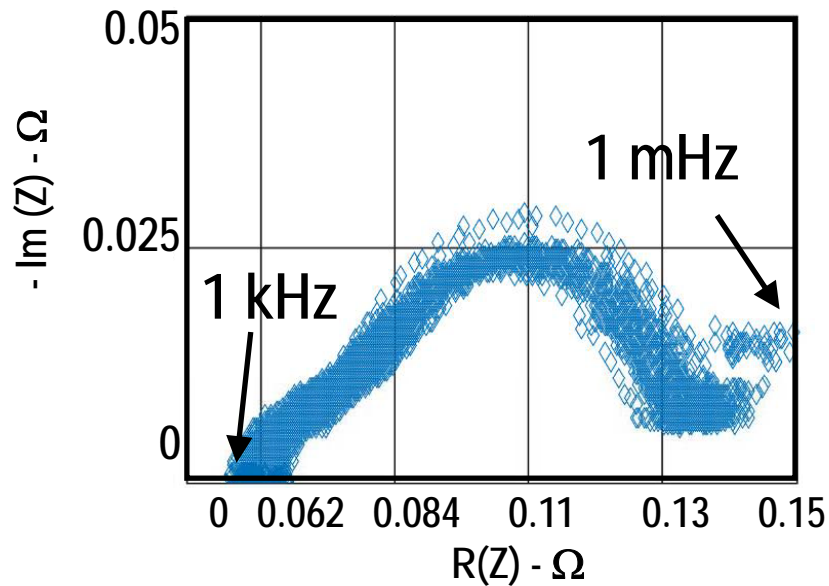


- 在 100 次充电之后化学容量减少 3-5%
- 电池阻抗随老化而增加
- 阻抗在 100 次充电之后几乎增加一倍。

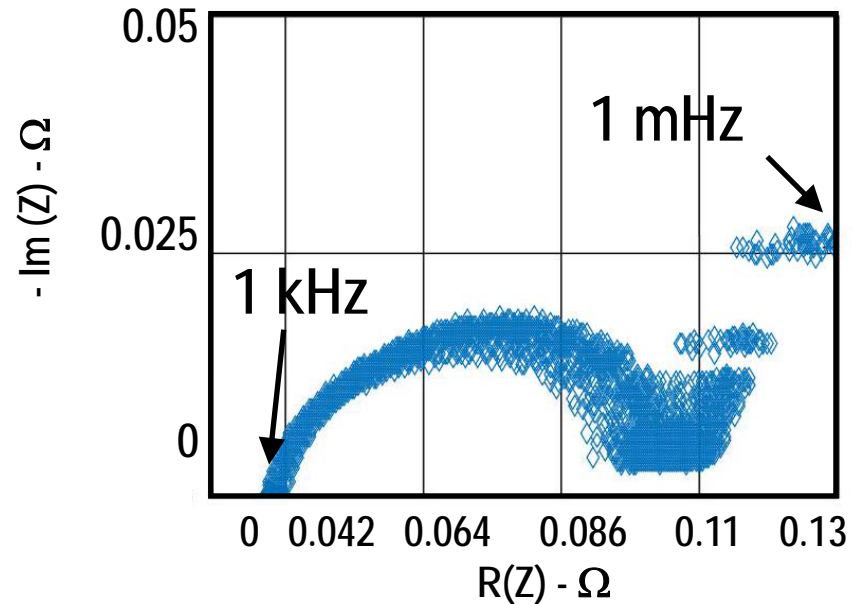
新电池的阻抗差异



制造商 1



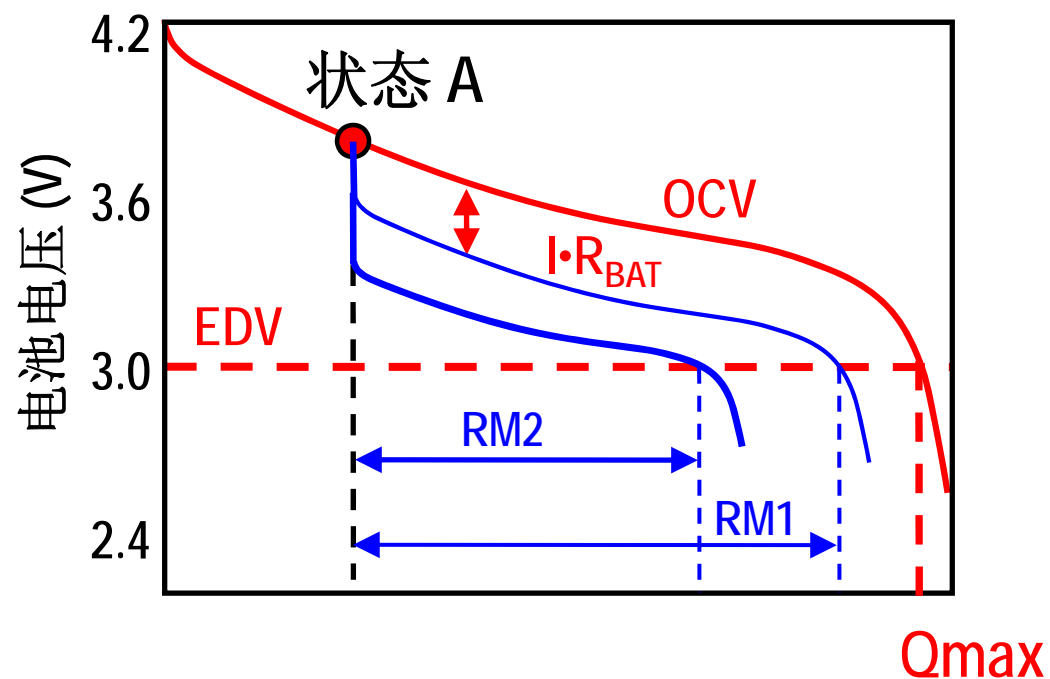
制造商 2



- 低频 (1 mHz) 阻抗偏差为 15%
- 在 1C 速率放电、40-mV 压差下，会引起 $\pm 26\%$ 的最大 SOC 误差

电池剩余容量 (RM)

RM: 从当前状态至 EDV 的电池容量



- RM 在不同的放电速率下是不一样的。

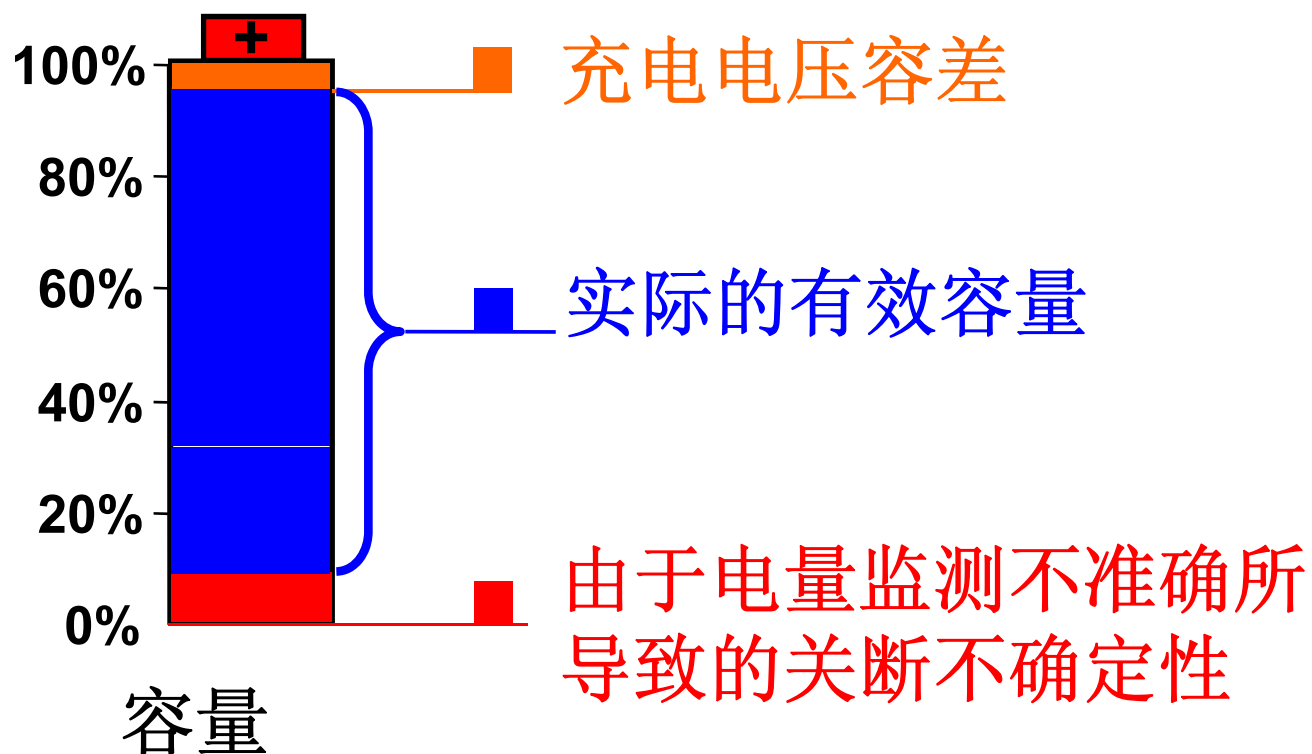
电池化学成分概要

- **Qmax** = 电池化学容量 (无负载)
- **Quse** = 可用容量 (与负载有关)
- 电池电阻和负载产生 **I-R** 压降
- **SOC** = 电荷状态 (%，取决于 **OCV**)
- **RM** = 剩余容量 (取决于负载)
- 电池老化会影响阻抗和容量

电池电量监测基础知识

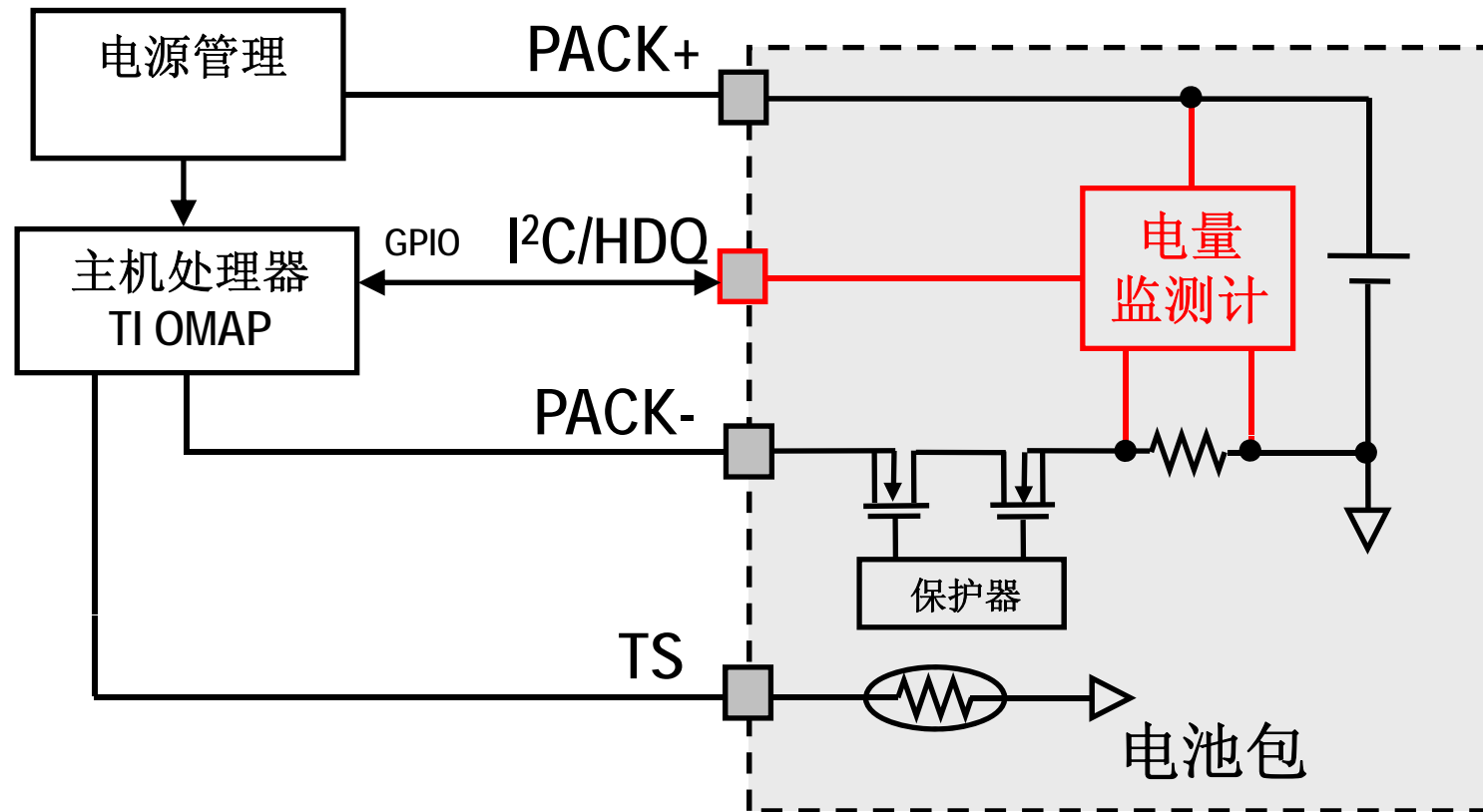
第二部分：传统的电池电量监测方法

目标：充分利用可用的电池容量



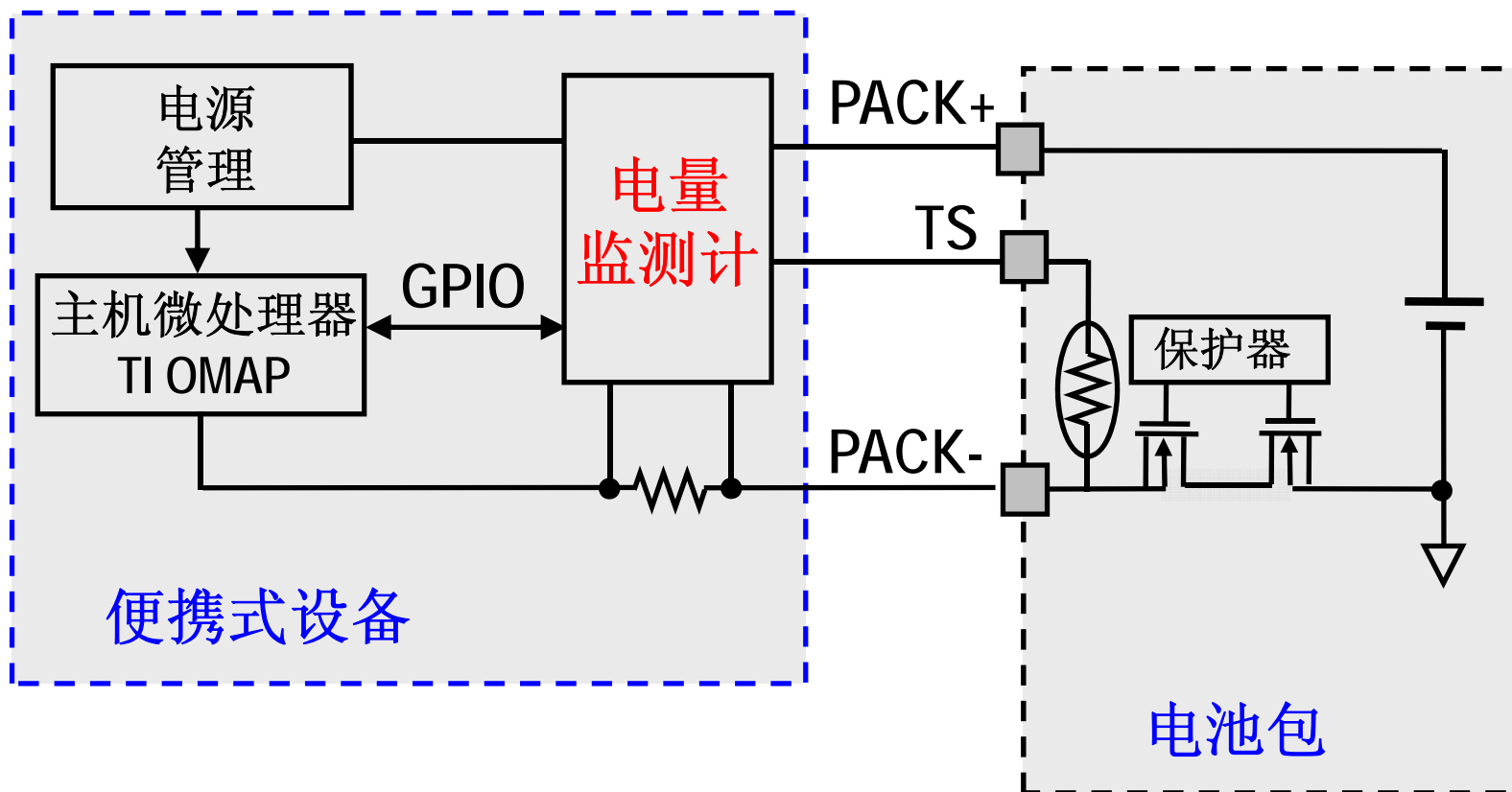
- 可用容量实际上也许只用了 80-90%!
- 高准确度的电量监测可延长电池的运行时间

传统的电池包侧电量监测计



产品示例: BQ27541 BQ27545 BQ27741 BQ27741 BQ28z560

系统侧阻抗跟踪电量监测计



产品示例: BQ28z550 BQ27510 BQ27520 BQ27435
BQ27421 BQ27441 BQ27410

电量监测计有哪些功能呢？

- 电池与用户之间的通信
- 测量：
 - 电池电压
 - 充电或放电电流
 - 温度
- 提供：
 - 电池运行时间和剩余容量
 - 电池健康状况信息
 - 总体电池电源管理（工作模式）

如何实现电量监测计？

- 基于电压：SOC = f (VBAT)

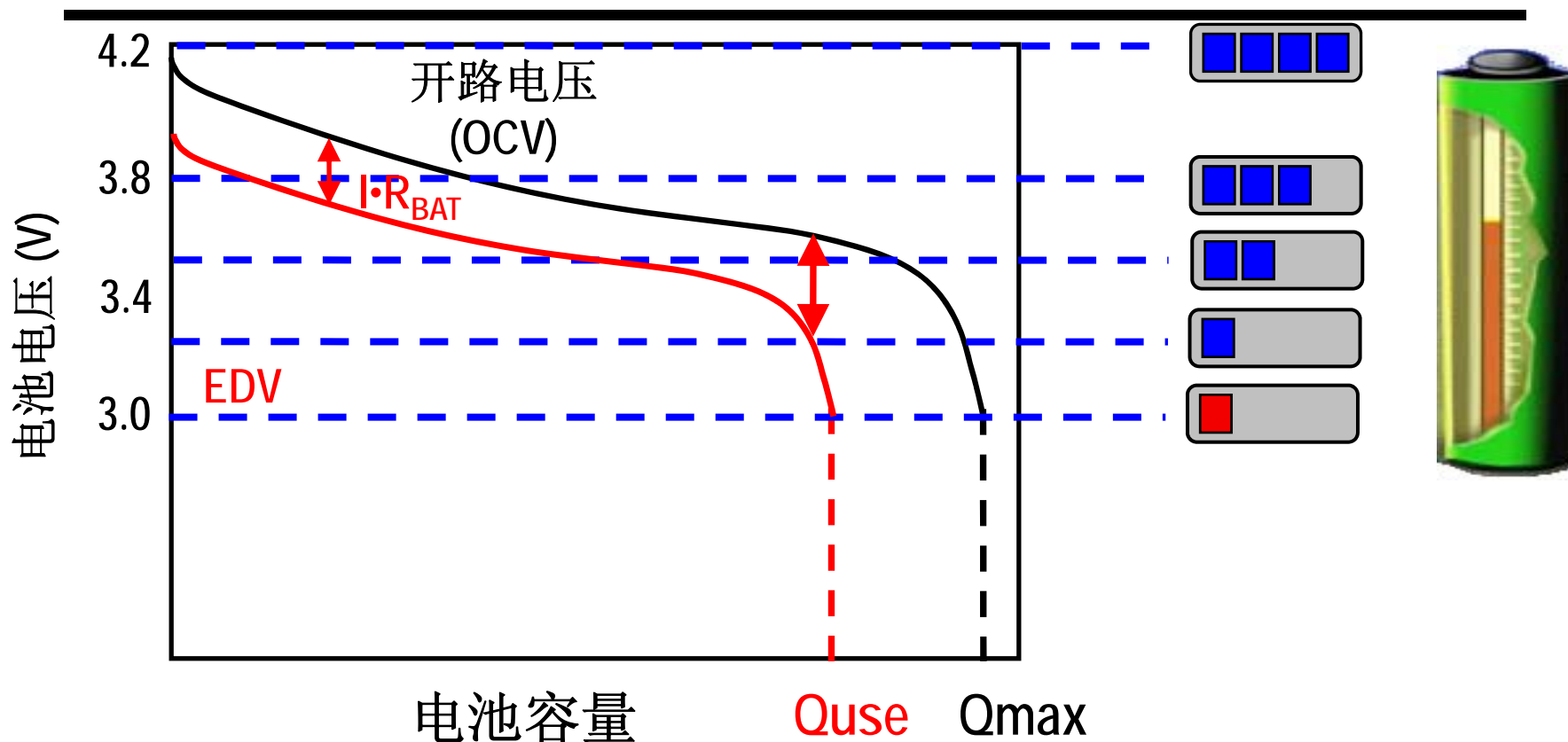
- 库仑计数：

$$Q = \int i \, dt$$

- 阻抗跟踪：实时电阻测量

$$V = V_{OCV} - I \cdot R_{BAT}$$

基于电压的电量监测计



- 应用：低端蜂窝电话、数码相机 (DSC)...
- 脉动的负载会导致电池容量指示条上下浮动
- 仅在非常低的电流下准确

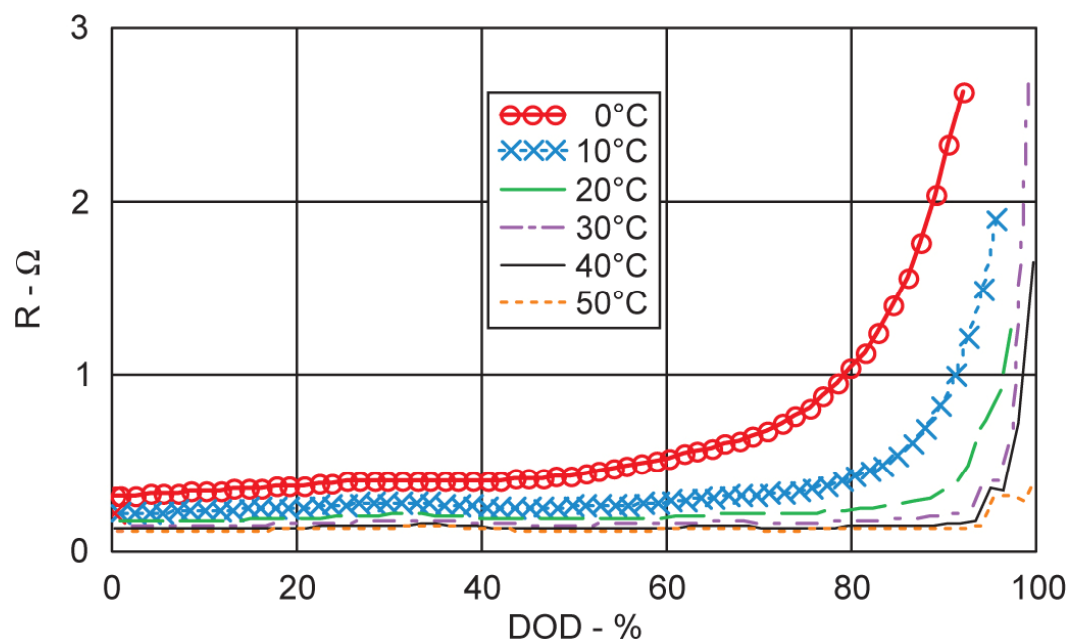
$$V = V_{OCV} - I \cdot R_{BAT} \quad ?$$

电池电阻

$$V = V_{OCV} - I \cdot R_{BAT}?$$

- 阻抗 = f(温度, 电荷状态, 和老化)
- 电阻在 100 次充放电之后将增加一倍
- 电池之间的电阻偏差为 10-15%
- 不同制造商的电池电阻偏差可达 10-15%

阻抗与温度和 DOD 有关



阻抗在很大程度上取决于温度、电荷状态及老化

$$SOC = \frac{Q}{Q_{max}}$$

满充电

完全放电

DOD = 1-SOC (电荷状态)

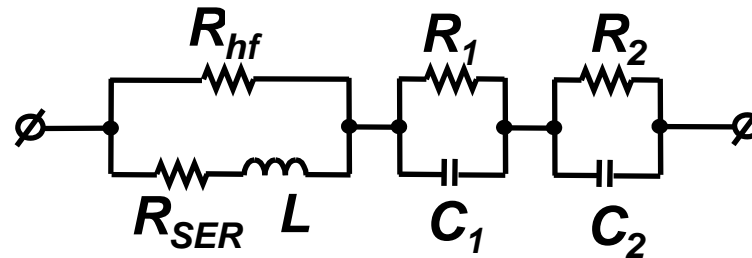
SOC = 1 (满充电电池)

SOC = 0 (完全放电电池)

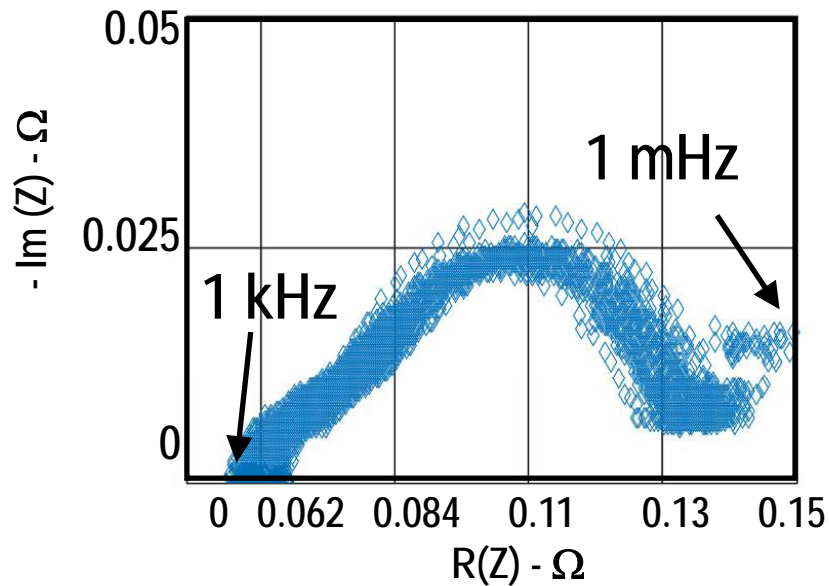
SOC: 电荷状态

DOD: 放电深度

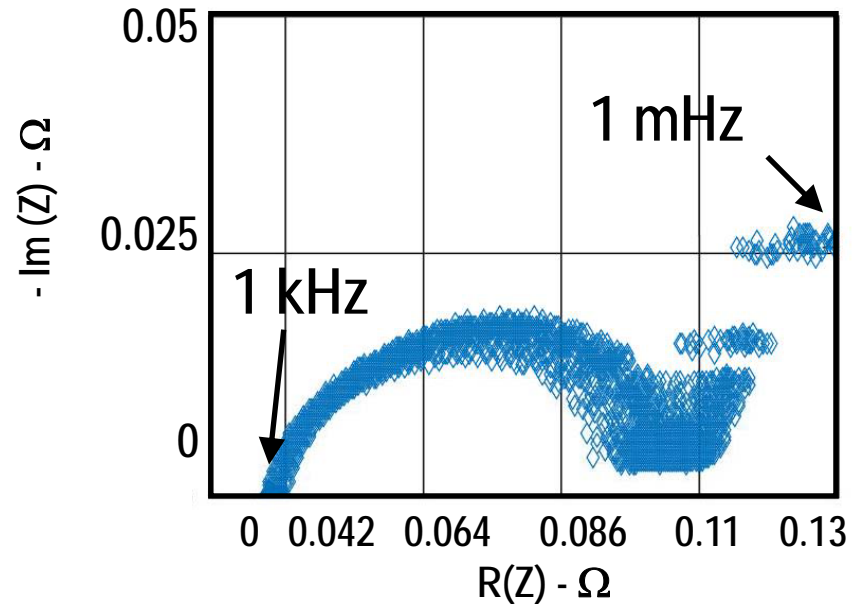
新电池的阻抗差异



制造商 1

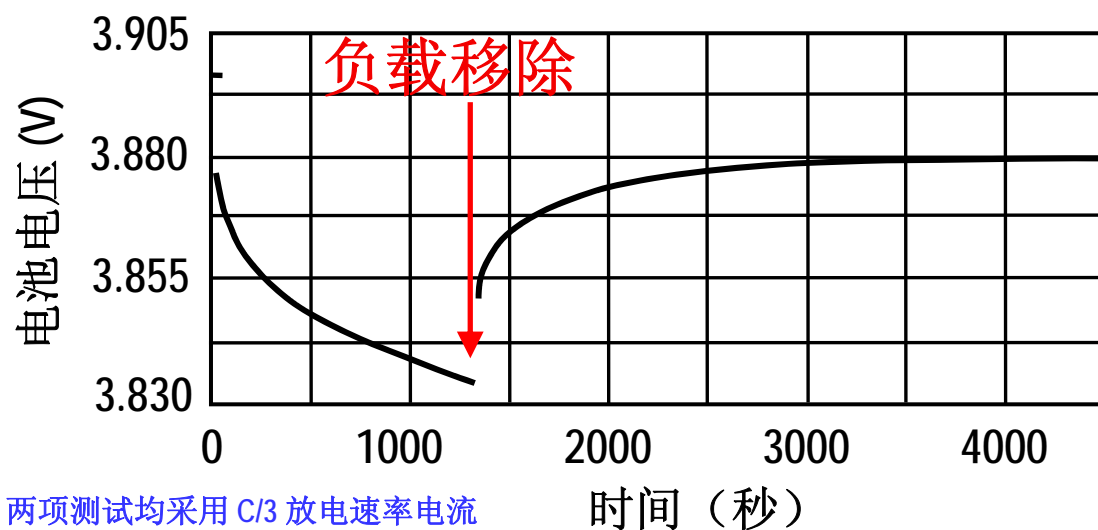


制造商 2

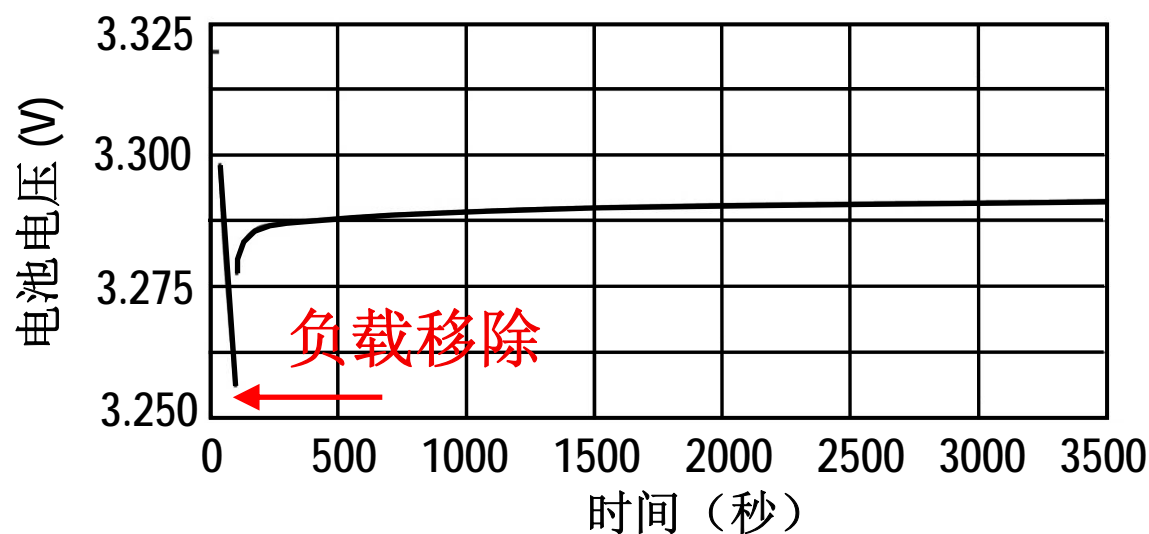


- 低频 (1 mHz) 阻抗偏差为 15%
- 在 1C 速率放电、40-mV 压差下，会引起 $\pm 26\%$ 的最大 SOC 误差

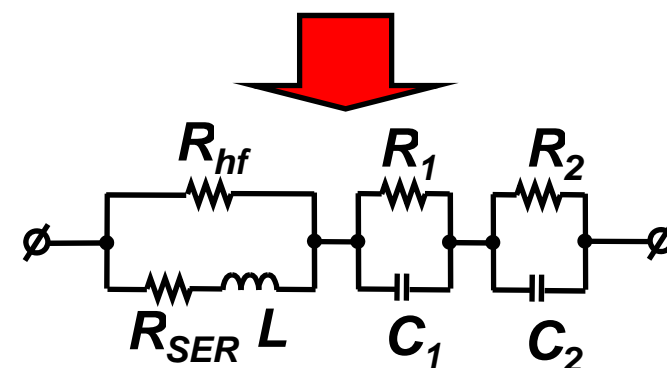
电池 - 瞬态响应



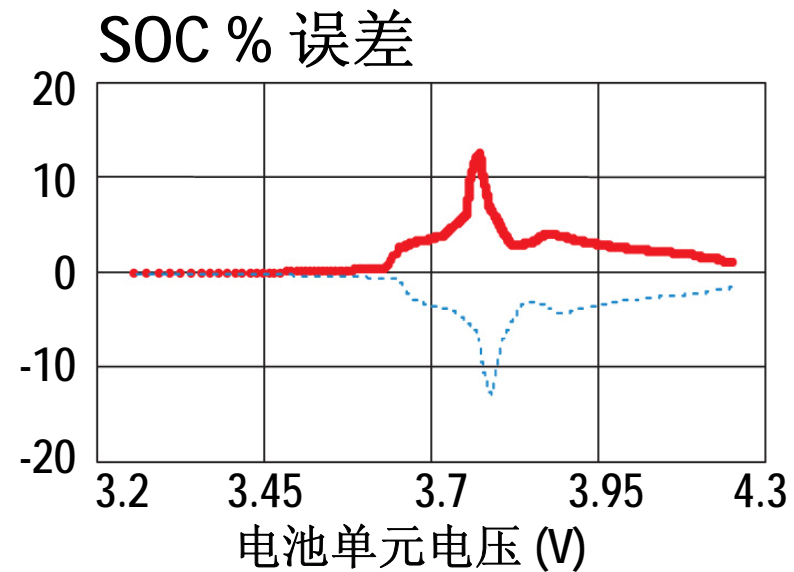
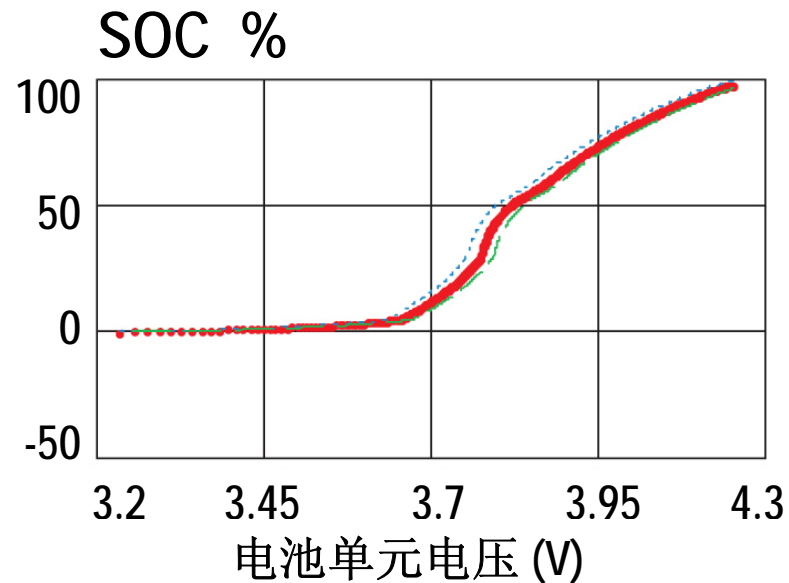
* 两项测试均采用 C/3 放电速率电流



- 完全弛豫需要大约 2000 秒的时间
- 在不同的时刻具有不同的电压
- 20 至 3000 秒之间的电压差异超过 20mV



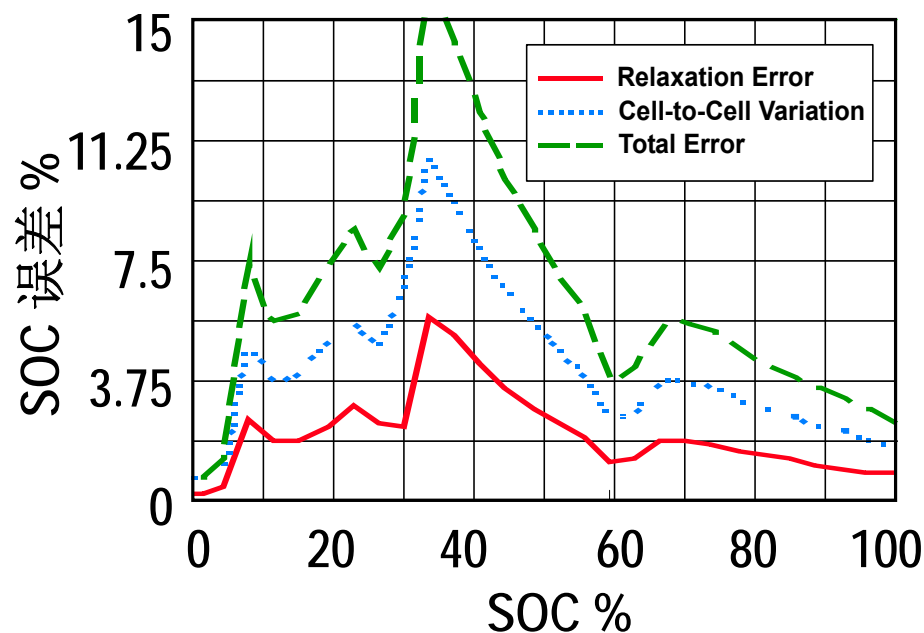
电压弛豫和电荷状态误差



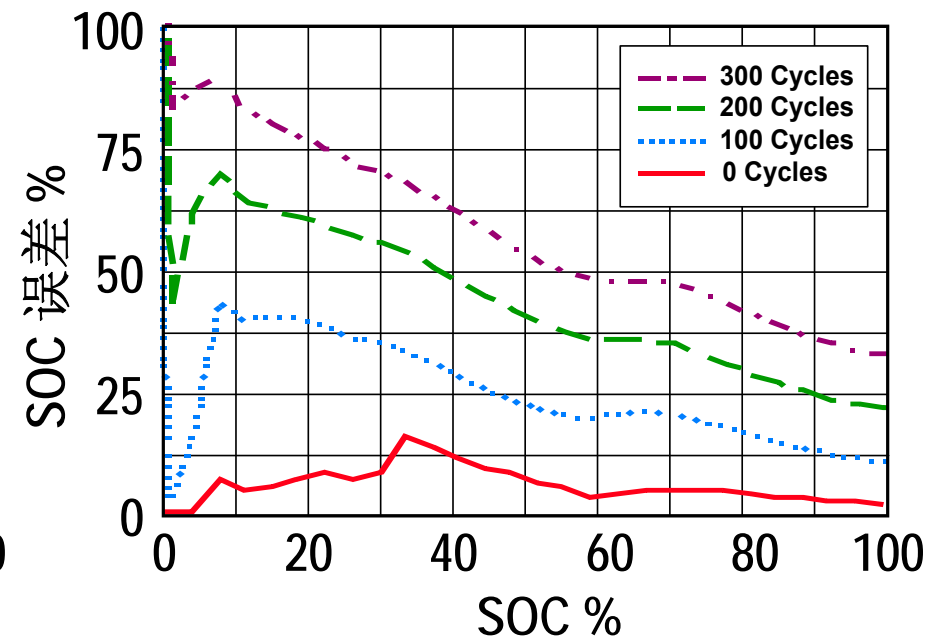
- $\pm 20\text{mV}$ 压差
- 误差取决于估计时刻的特定电压
- 最大误差达到 15%，平均误差为 5%

基于电压之电量监测的 SOC 误差

新电池的误差



误差随老化 的演变情况



$$V = V_{OCV} - I \cdot R_{BAT} \quad ?$$

- 20-mV 弛豫测量误差
- 15% 的电池间电阻容差
- 每充电 100 次电池的电阻将增加一倍

基于电压的电量监测计

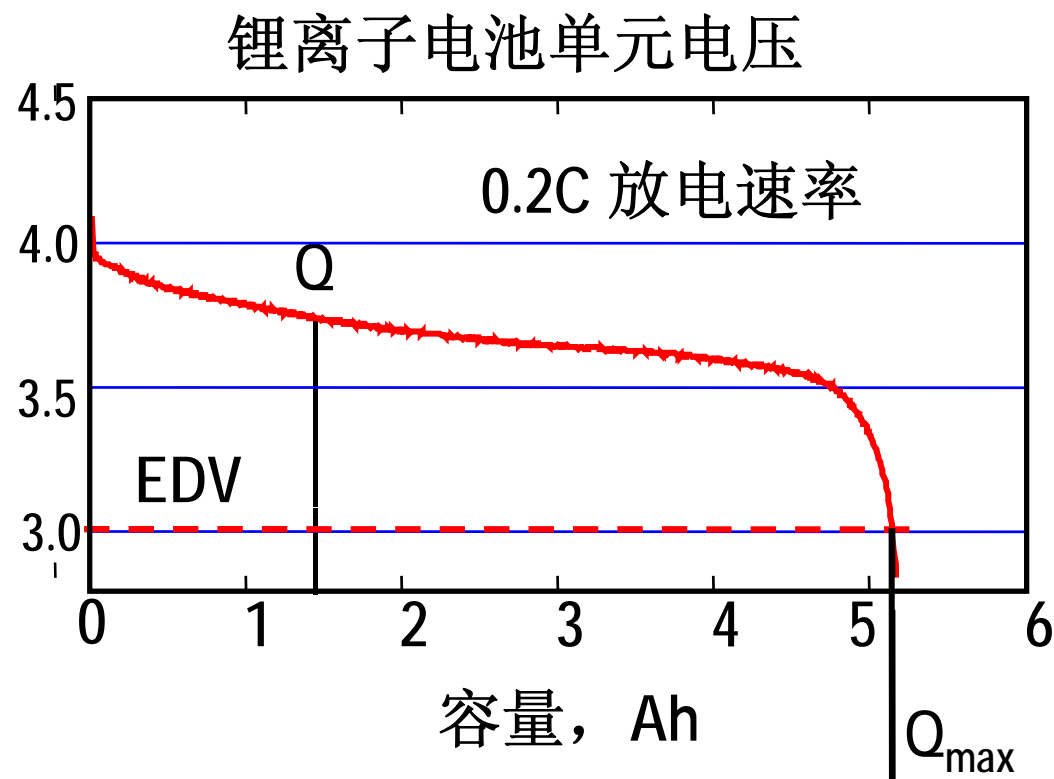
- 优势
 - 无需完全放电就能进行学习
 - 自放电无需校正
 - 在小负载电流条件下非常准确
- 劣势
 - 由于内部电池阻抗的原因，准确度欠佳
 - 阻抗与温度、老化和电荷状态之间存在函数关系

基于库仑计数的电量监测

- 电池处于满充电状态
- 在放电过程中容量被积分
- 每次发生完全放电时 Q_{\max} 都被更新

$$Q = \int i \, dt$$

EDV: 放电终止电压



产品示例: **BQ27010**、**BQ27210**

基于库仑计数的电量监测

产品示例: **BQ 27010**、**BQ 27210**

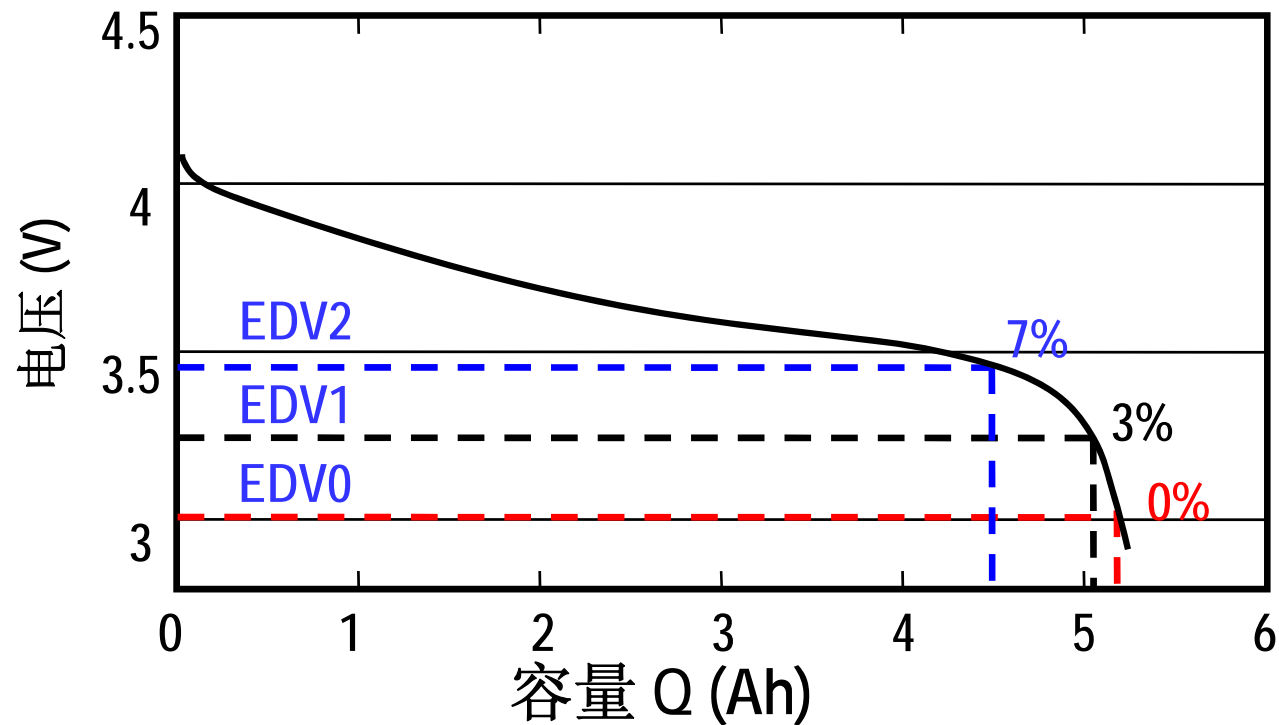
BQ 27010:

<http://www.ti.com.cn/product/cn/bq27010>

BQ 27210:

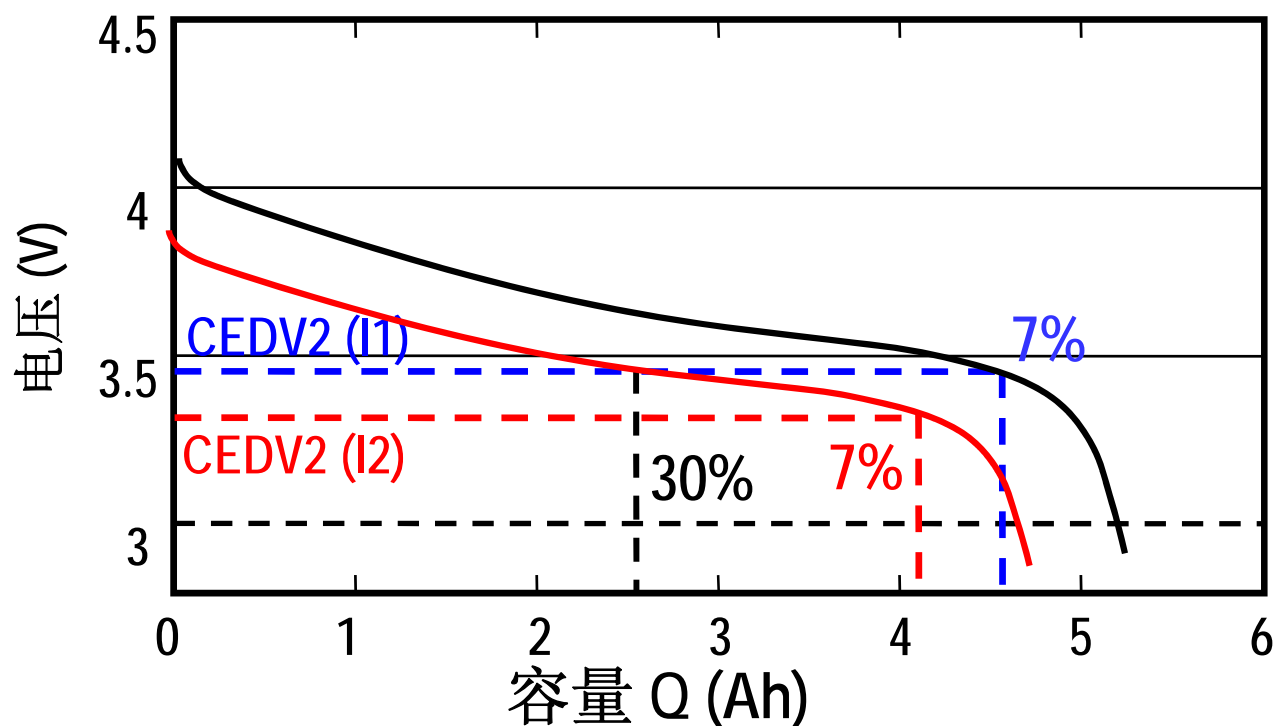
<http://www.ti.com.cn/product/cn/bq27210>

在完全放电之前进行学习



- 当达到 0% 容量时再学习就太迟了
- 针对给定的剩余容量百分比来设定电压门限
- 7%、3% 剩余容量时的真实电压取决于电流、温度和阻抗

经补偿的放电终止电压 (CEDV)



$$\text{CEDV} = \text{OCV}(T, \text{SOC}) - I * R(T, \text{SOC})$$

- 建模: $R(\text{SOC}, T)$, 适用于新电池
- 计算任意电流 (I) 和 温度 (T) 条件下的 CEDV2 (7%) 和 CEDV1 (3%) 门限
- 对于老化的电池则不准确

产品示例: BQ 3060

电池管理产品—电池电量检测-BQ3060

BQ 3060

参数

	BQ3060
Pin/Package	24TSSOP
Operating Temperature Range (C)	-40 to 85
Approx. Price (US\$)	3.25 1ku
Rating	Catalog
	样片



<http://www.ti.com.cn/product/cn/bq3060>

基于库仑计数的电量监测

优势

- 不受电压测量失真的影响
- 准确度由电流积分硬件确定
- 监测误差：3-10%（取决于工作条件和用途）

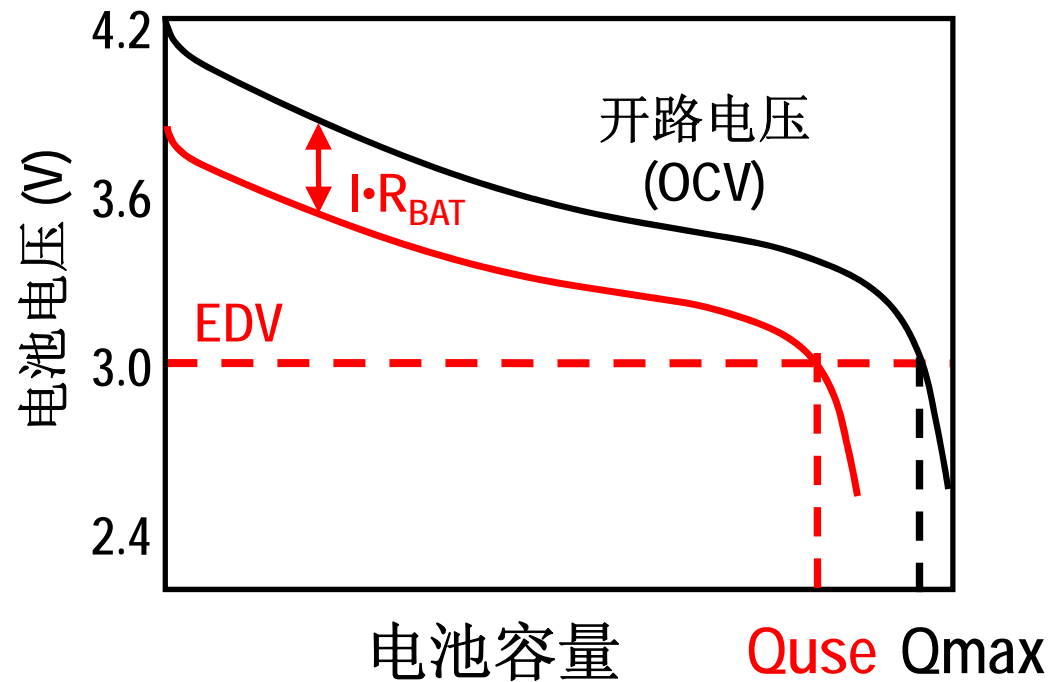
劣势

- 需要学习周期以更新 Q_{\max}
 - 电池容量随老化而下降
 - Q_{\max} 减少幅度：3-5%（100 次充电）
 - 在不学习的情况下，每充电 10 次监测误差将增加 1%
- 自放电必须建模：不准确

与老化相关的主要参数：阻抗

$$V = V_{OCV} - I \cdot R_{BAT}?$$

对于典型电量监测计的优势



- 在没有负载的情况下（弛豫）可从 OCV 实现非常准确的电量监测
- 在有负载的情况下，可利用库仑计数实现非常准确的监测

电池管理产品—电池电量检测-BQ3060

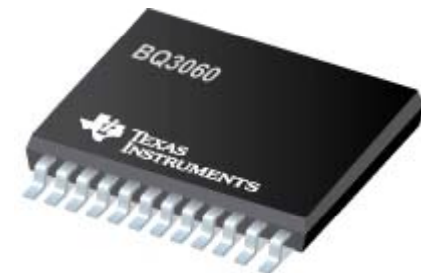
BQ 3060



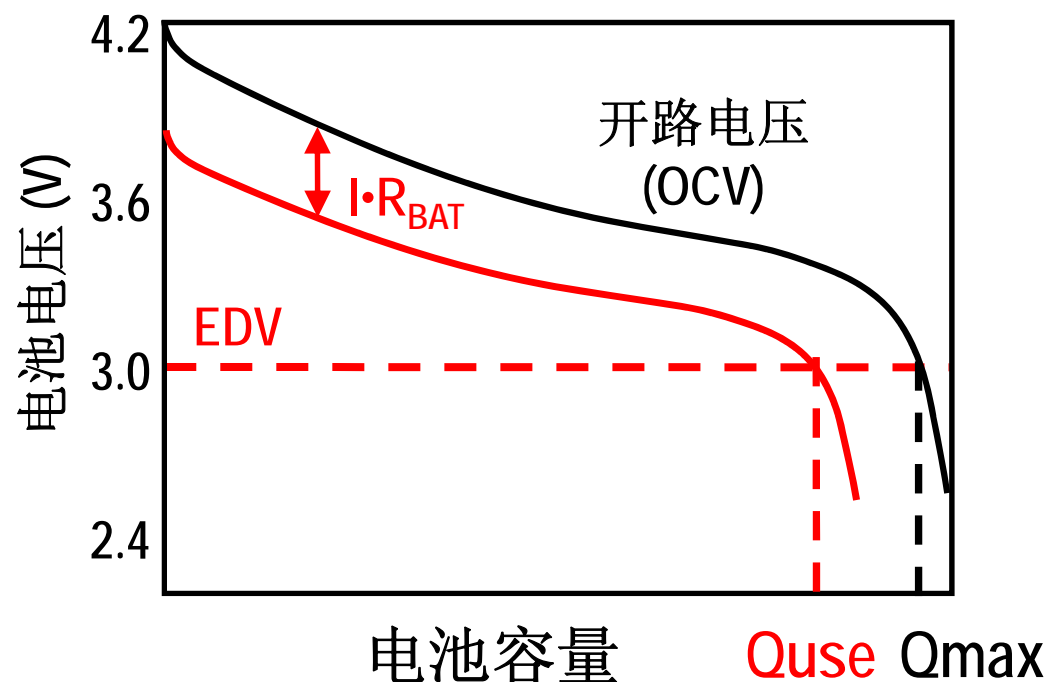
<http://www.ti.com.cn/product/cn/bq3060>

BQ 2084

<http://www.ti.com.cn/product/cn/bq2084-v140>



问题考察



- 基于电压的电量监测计: $V = OCV(T, SOC) - I \times R(T, SOC, \text{老化})$
 - 电流积分电量监测计: $CEDV = OCV(T, SOC) - I \times R(T, SOC, \text{老化})$

问题: 电池阻抗

电池电量监测基础知识

第三部分：阻抗跟踪技术的优势

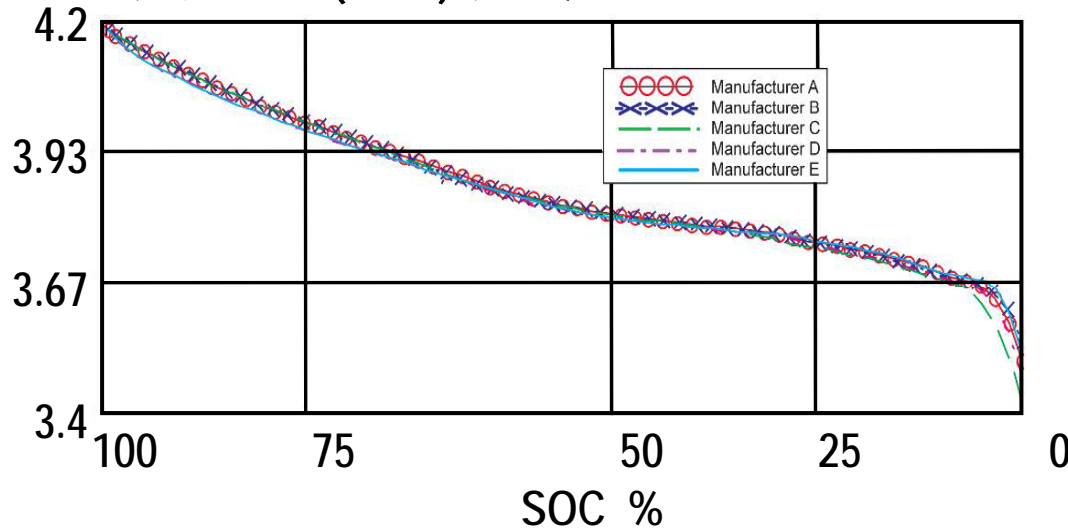
Impedance Track™ 电量监测

- 基于电压的电量监测：可在无负载条件下提供准确的监测
- 基于库仑计数的电量监测：可在有负载条件下提供准确的监测
- 整合了基于电压和基于电流之监测方法的优势
- 实时阻抗测量
- 采用开路电压和阻抗信息来计算给定平均负载条件下的剩余运行时间。

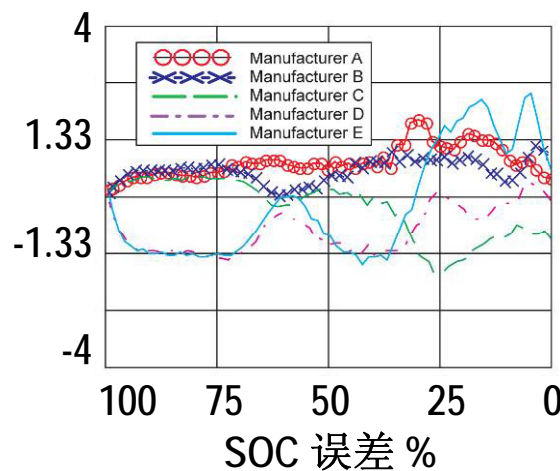
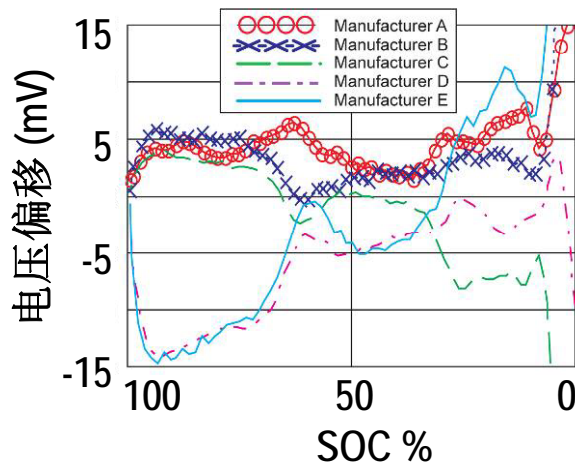
$$V = \text{OCV}(T, \text{SOC}) - I * R(T, \text{SOC}, \text{Aging})$$

OCV = f (SOC, T) 曲线的比较

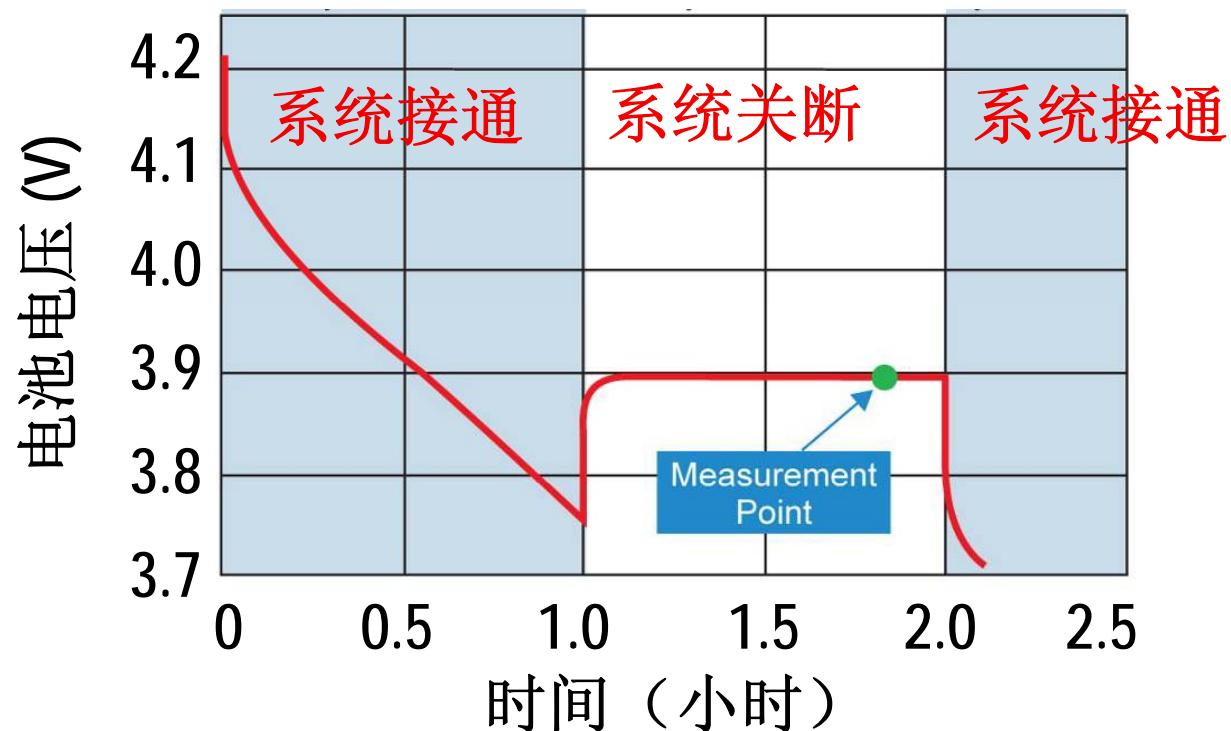
开路电压 (OCV) 曲线



- 对于所有被测试制造商的产品，OCV 曲线皆很相似
- 大多数的电压偏移 < 5 mV
- 平均 SOC 预测误差 < 1.5%
- 对于来自不同制造商的同种化学成分电池，可以使用相同的数据库



怎样测量 OCV ?



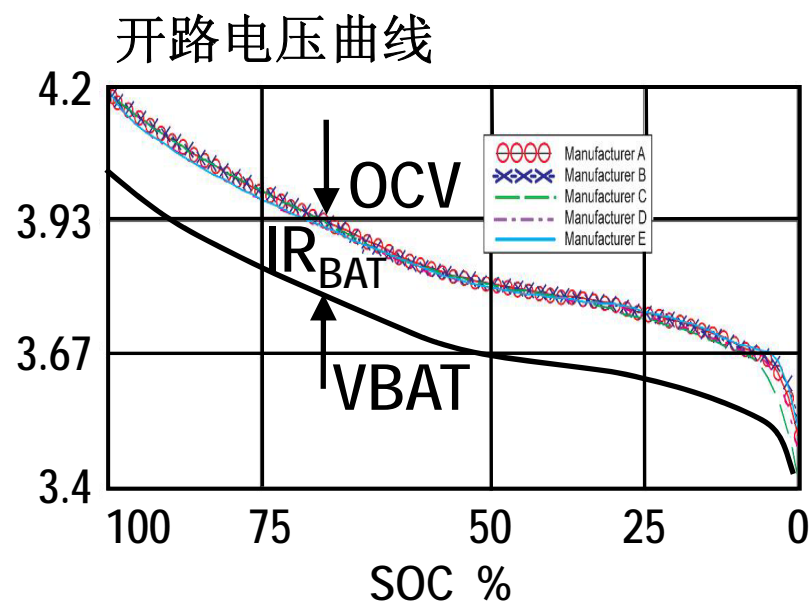
- OCV 测量允许 SOC 具有 0.1% 的最大误差
- 取消了自放电估测

怎样测量阻抗?

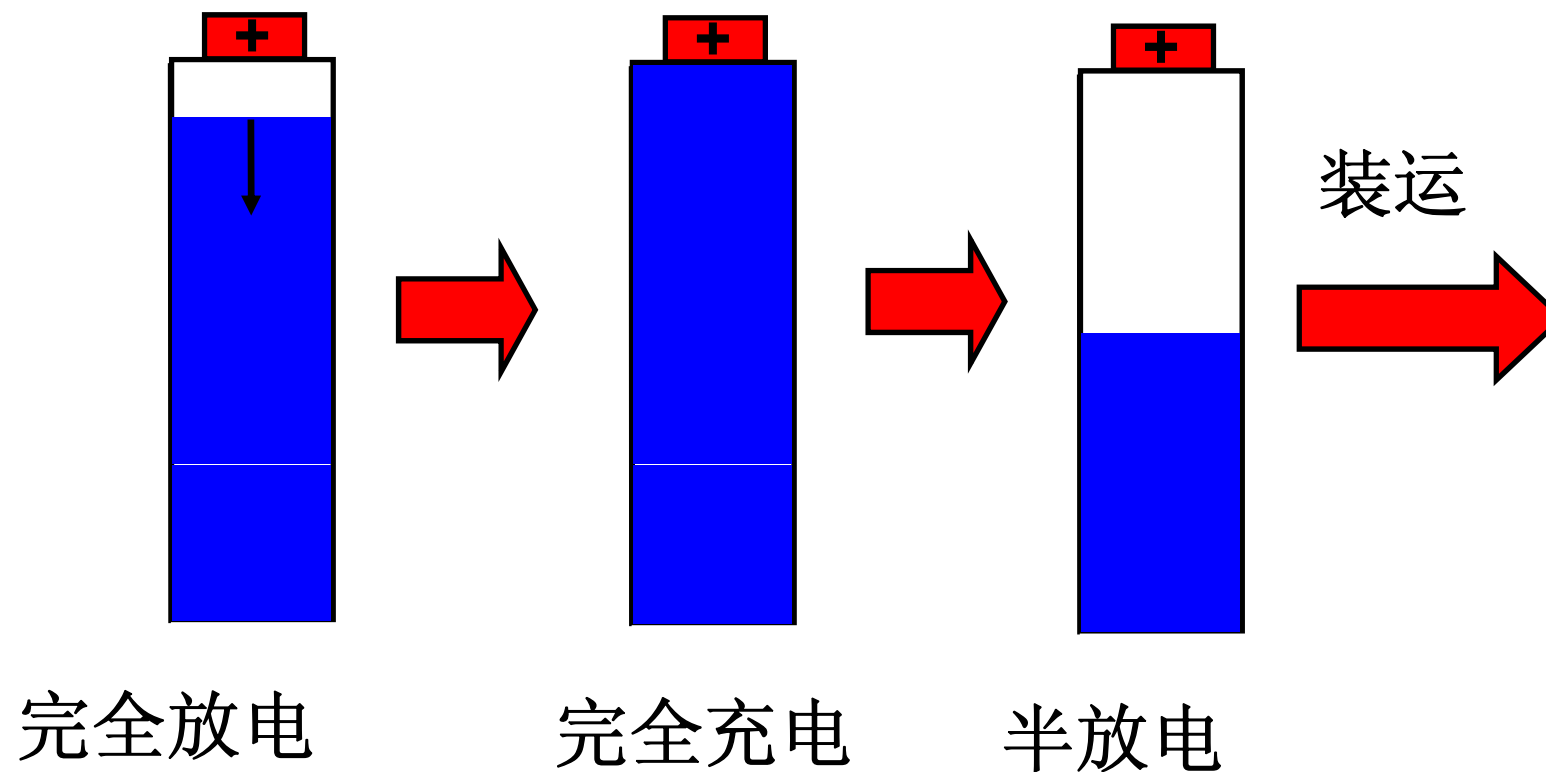
- 数据闪存包含一个固定的表格: $OCV = f(SOC, T)$
- IT 算法: 充电和放电期间的实时测量和计算。

$$R_{BAT} = \frac{OCV - V_{BAT}}{I_{AVG}}$$

$$V = OCV(T, SOC) - I * R(T, SOC, \text{老化})$$

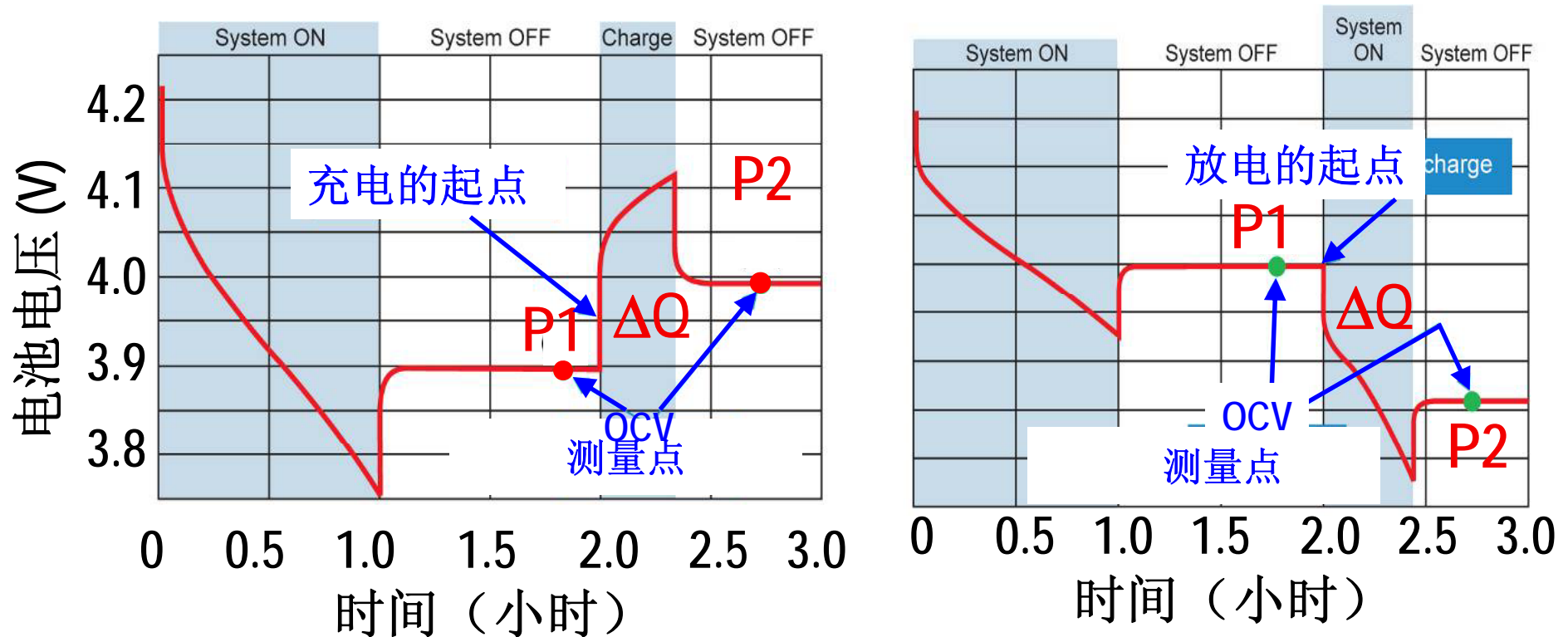


对于传统电池容量学习的问题



- 需要采用许多的测试设备并花费大量的时间。
- 用户有可能永远无法实现电池的完全放电以学习容量。
- 在不学习的情况下，每充电 10 次监测误差就将增加 1%。

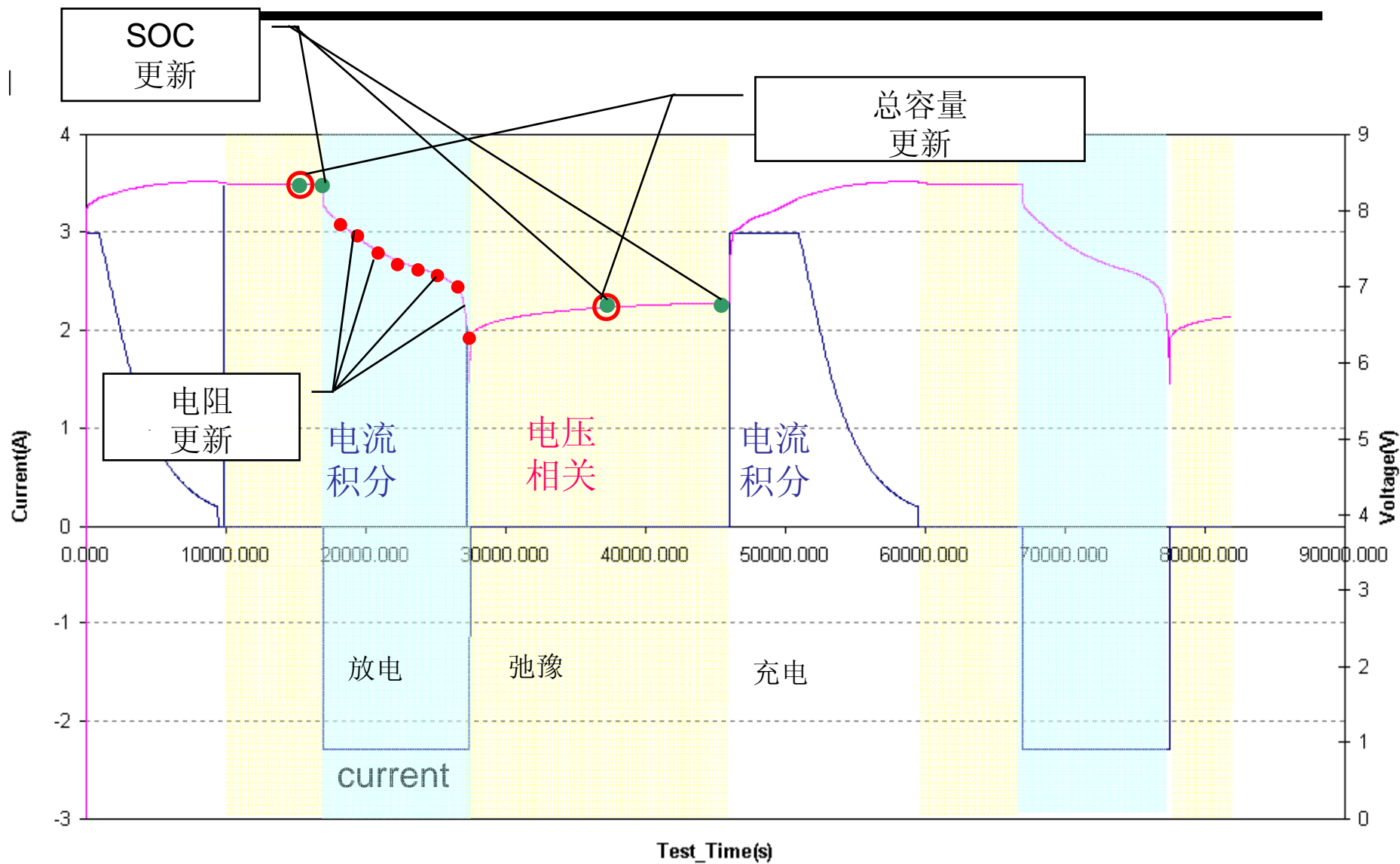
在未完全放电的情况下学习 Qmax



- 传递的电荷数量由精确的库仑计数来确定
- SOC1 和 SOC2 利用其 OCV 进行测量
- 这种方法适用于充电或放电过程

$$Q_{max} = \frac{\Delta Q}{SOC1 - SOC2}$$

积分模式与相关模式之间的合作



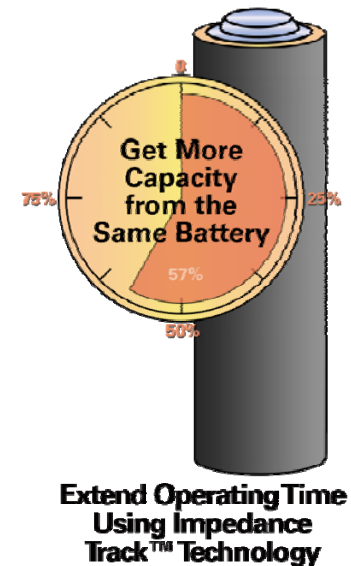
阻抗跟踪电量监测计

优点

- 整合了基于电压和库仑计数这两种电量监测方法各自的优势
- 在小电流 (OCV) 和大负载电流时均可提供准确监测
- 弃用不准确的自放电模型（采用 OCV 读取）
- 对于新电池和老化电池可提供非常准确的电量监测
- 容量学习无需满充电和完全放电
- 产品示例: **BQ 27510** <http://www.ti.com.cn/product/cn/bq27510-g2>
- **BQ 27541** <http://www.ti.com.cn/product/cn/bq27541-g1>

电量监测的好处

- 可准确地报告电池的剩余运行时间
- 可提供更好的电源管理
- 可获得更长的电池运行时间
 - 电源管理
 - 准确度：关断所需的保护间隔较小
 - 可根据阻抗随温度、放电速率和老化情况改变关断电压
- 按序关断
 - 当电池失效时可利用储备能量自动地将数据保存至闪存
- 电量监测可实现移动应用



运行时间比较示例

Impedance Track™ 监测计关断与 OCV 关断点的比较

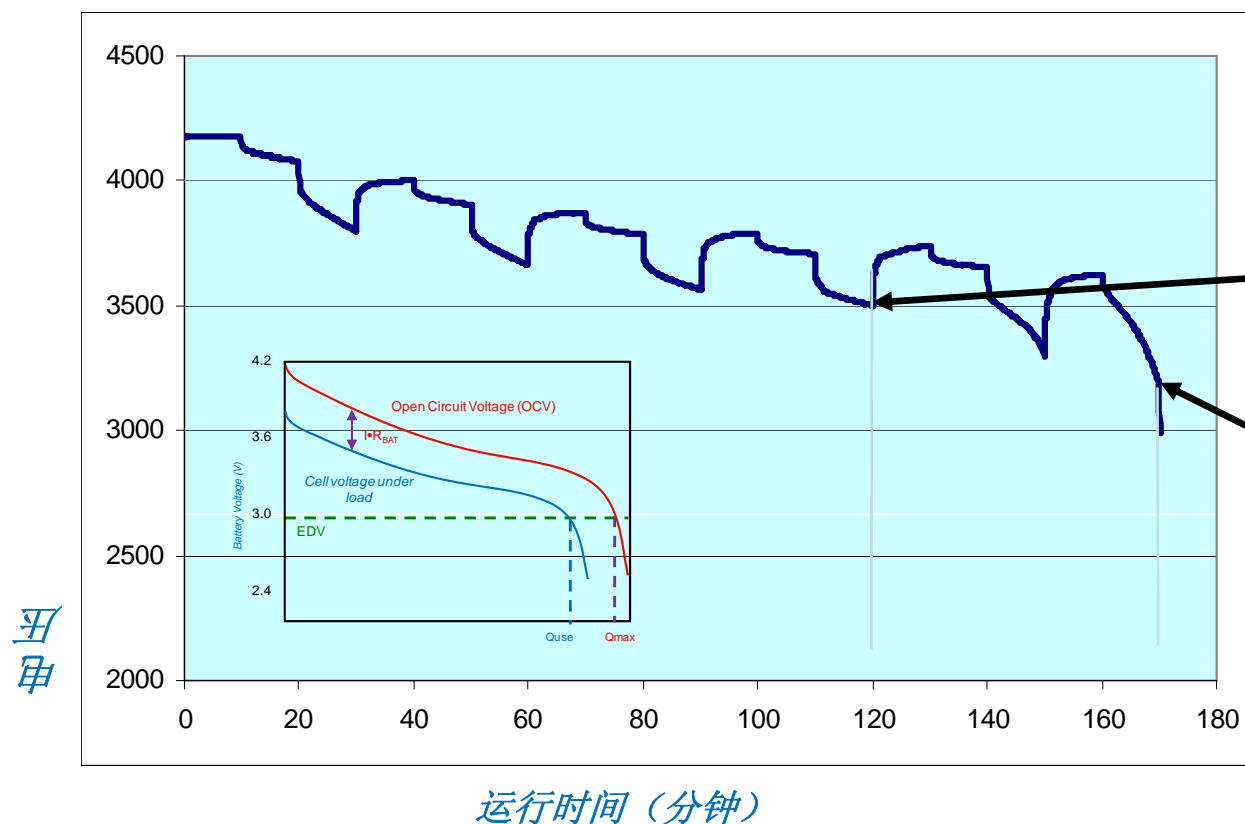
- 不具备准确监测计的系统简单地在某个固定电压下关断
- 智能手机、平板电脑、便携式医疗、数码相机等需要备用电池能量来完成关断任务
- 许多设备都在 **3.5V** 或 **3.6V** 时关断，以顾及备用容量最差的情况
 - 在此比较当中使用的是 **3.5V** 关断
 - 监测计将计算剩余容量并改变关断电压，直到在所有情况下均确切地留有备用容量为止。
 - 使用 **10 mAH** 备用容量
 - 电池的~~温度~~和老化状况是变化的

电量监测

OCV 与 IT 用例经验值的比较 - 带可变混合负载的新电池

条件:

- 新电池
- 室温 (25° C)
- 10 mAh 备用容量 (用于关断)



OCV

关断 (在 3.5V)
120 分钟运行时间

Impedance Track™ 监测计

关断 (在 3.295V)
168 分钟运行时间



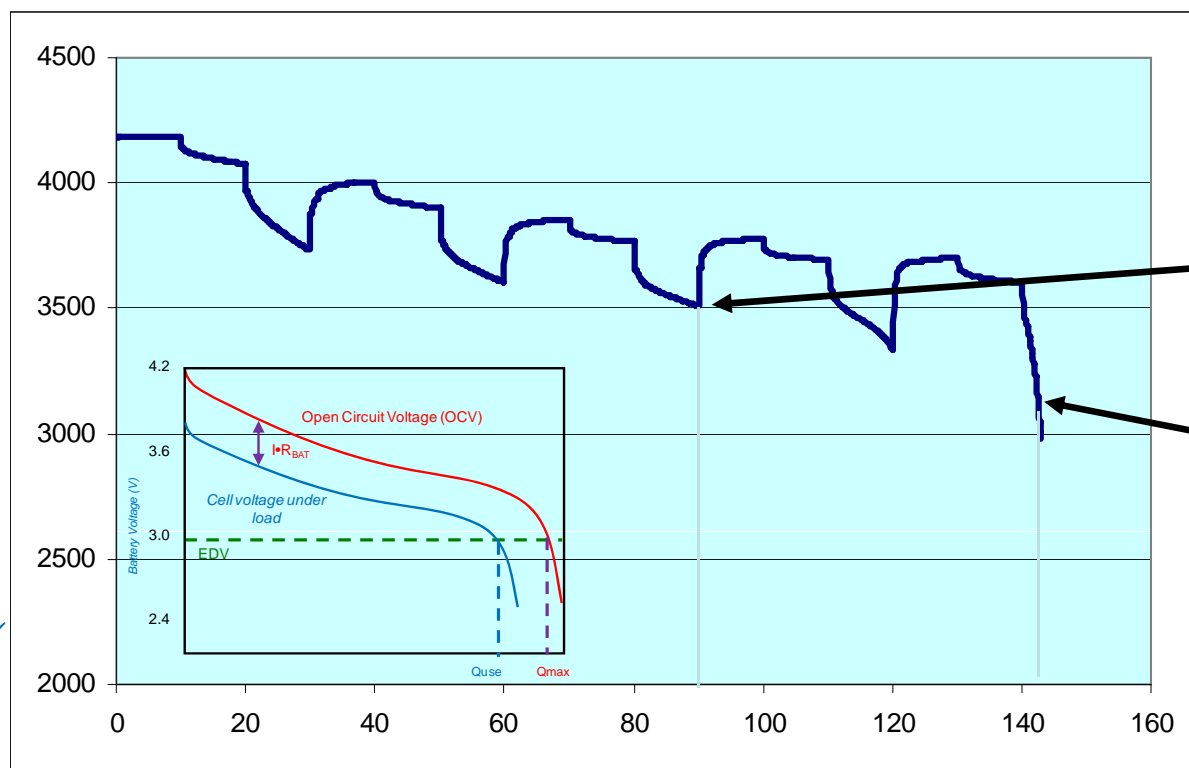
采用 TI 监测计
使运行时间延长了:
+40%

电量监测

OCV 与 IT 用例经验值的比较 - 带可变混合负载的旧电池

条件

- 室温 (25 ° C)
- 10 mAh 备用容量 (用于关断)



运行时间 (分钟)

OCV

关断 (在 3.5V)
90 分钟运行时间

Impedance Track™ 监测计关断

(在 3.144V)
142 分钟运行时间



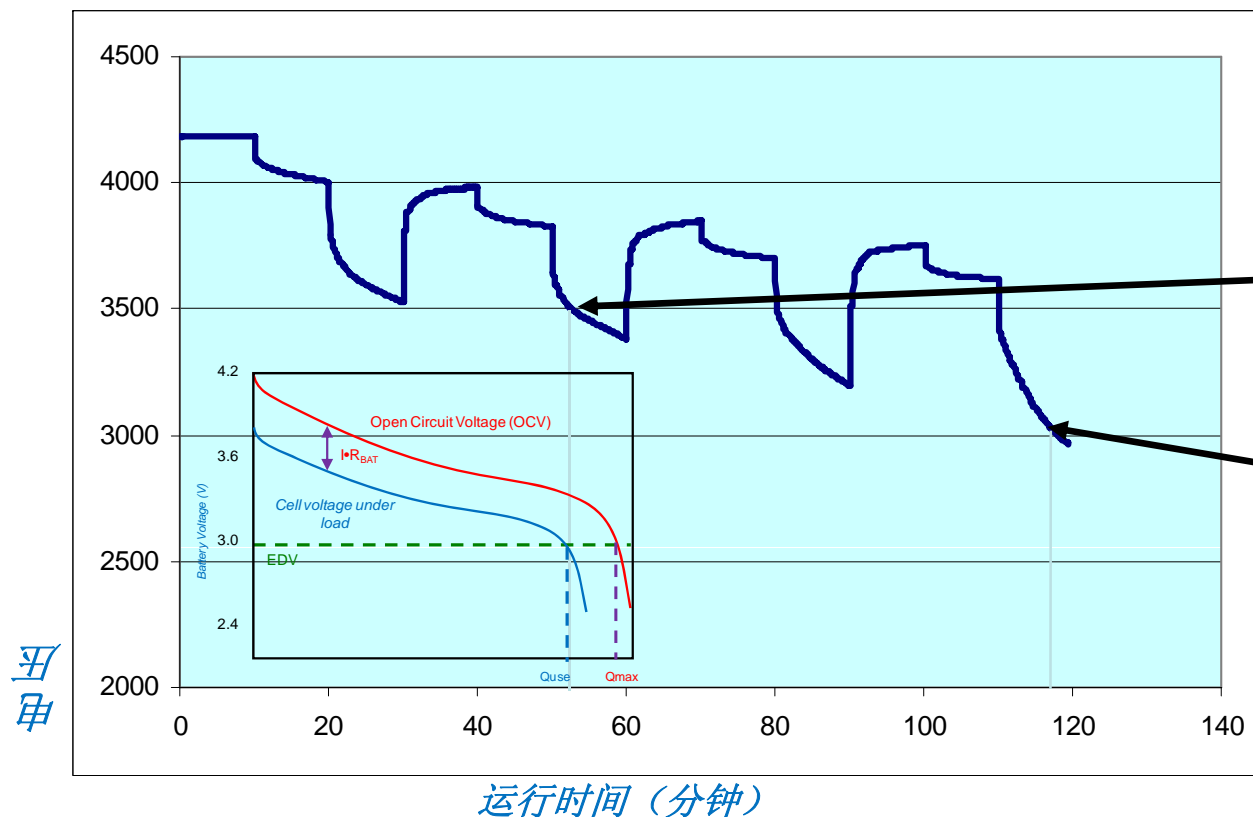
采用 TI 监测计
使运行时间延长了:
+58%

电量监测

OCV 与 IT 用例经验值的比较 - 低温条件下带可变混合负载的新电池

条件 电池

- 低温 (0°C)
- 10 mAh 备用容量 (用于关断)



OCV

关断 (在 3.5V)
53 分钟运行时间

Impedance Track™ 监测计

关断 (在 3.020V)
117 分钟运行时间



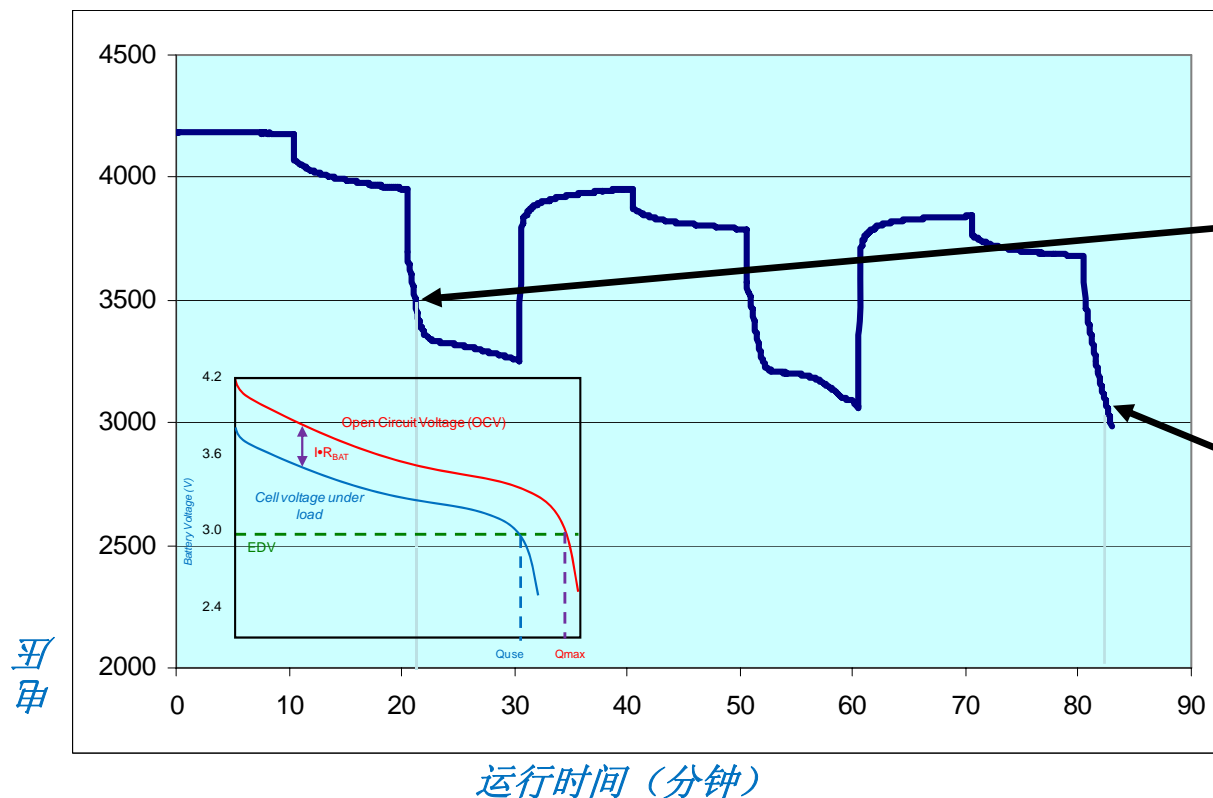
采用 TI 监测计
使运行时间延长了:
+121%

电量监测

OCV 与 IT 用例经验值的比较 - 低温条件下带可变混合负载的旧电池

条件 (0° C)

- 低温 (0° C)
- 10 mAh 备用容量 (用于关断)



OCV

关断 (在 3.5V)
21 分钟运行时间

监测计关断 (在
3.061V) ;
82 分钟运行时间

采用 TI 监测计
使运行时间延长了:
+290%

电量监测 – Impedance Track™ 技术的优势

- 动态（学习）能力
 - 应用中的温度可变性
 - IT 考虑到了由于温度的上升/下降所引起的电池阻抗变化
 - IT 引入了热模拟以针对自发热进行调节
 - 负载变化
 - IT 将跟踪由于高负载尖峰所引起的电压降
- 老化电池
 - IT 拥有针对因电池老化所致的可用容量变化进行调节的能力
- 延长运行时间
 - 借助基于 IT 的监测计可采用较低的终止电压
- 灵活性
 - 电池特性分析
 - 主机系统无需执行任何计算或监测算法

未得到使用的电池容量的含义

- 电池成本：每 **100mAh** 容量的平均成本为 **0.15 美元**
- 较低的终止电压 (**TV**) = 较大的电池容量
- 对于新电池，**TV** 降低 **500mV** 可增加大约 **5%** 的容量 → 就 **1500mAh** 电池而言节省了约 **0.10 美元**
- 对于老化电池，**TV** 降低 **500mV** 可增加大约 **50%** 的容量 → 可节省约 **1.00 美元**（就 **1500mAh** 电池而言）并延长运行时间！
- *为制造商提供了节省成本的机会，同时还延长了最终用户的电池运行时间*

由于监测不准确而造成的损失

- 假设客户每天进行一次充放电 → 3 个月的使用时间 = 90 天，大约充电 90 次 → 电池内部阻抗几乎增加一倍 → 出现电池老化的情况
- 未采用阻抗跟踪的监测计 → 由于电池逐步老化的原因而产生了不准确的监测结果 → 短得多的运行时间乃至发生系统崩溃
- 运营商的电池质保期可能为一年甚至两年。
- 客户由于故障监测结果的缘故而将整部设备退货 → 质保期内的退货将使公司蒙受经济损失
- 基于阻抗跟踪的监测计能够延长电池运行时间，并避免发生因故障监测结果所致的一些代价高昂的退货

总结

- 就便携式电子产品而言，准确的监测计对于获得长运行时间的重要性丝毫不亚于降低设计方案的功耗及采用强健的电池。
- 可用的电量监测计有很多种，它们采用了不同的监测方法和不同的折衷方案。

备用幻灯片：
阻抗跟踪参考

单节电池阻抗跟踪 (IT)

基本术语和关系

- OCV – 开路电压
- Q_{max} – 最大电池化学容量

$$Q_{max} = \frac{PassedQ}{|SOC_1 - SOC_2|}$$

(SOC_1/SOC_2 在 OCV_1/OCV_2 测量之后利用 OCV 表实现相互关联)

- SOC – 电荷状态

$$SOC = 1 - \frac{PassedQ^*}{Q_{max}}$$

• (* 从满充电状态)

- RM – 剩余容量

$$RM = (SOC_{start} - SOC_{final}) \times Q_{max}$$

• (SOC_{start} 是当前的 SOC, SOC_{final} 是系统终止电压下的 SOC)

单节电池阻抗跟踪 (IT)

基本术语和关系

- FCC – 满充电容量指的是以某一给定的放电速率从满充电状态直至达到系统终止电压的电荷传递量

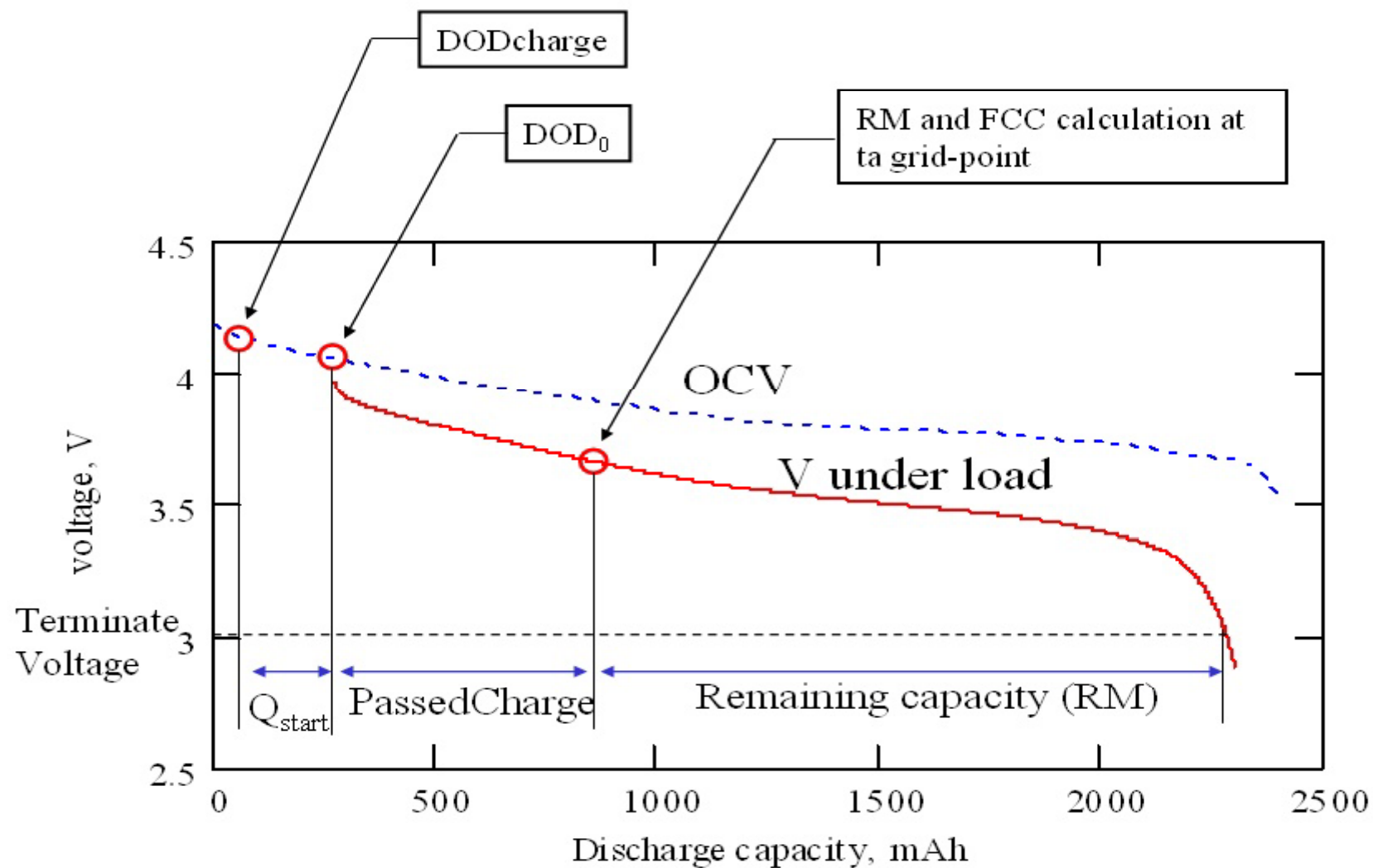
$$\bullet \quad FCC = Q_{start} + PassedQ + RM$$

- RSOC – 相对电荷状态

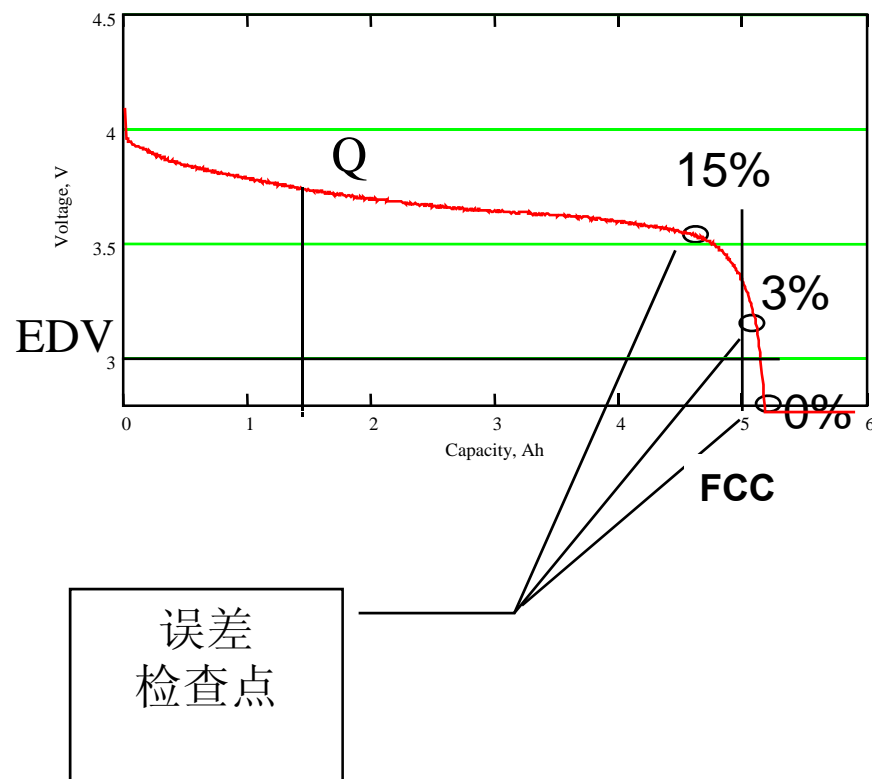
$$RSOC = \frac{RM \times 100}{FCC}$$

单节电池阻抗跟踪 (IT)

电量监测计介绍



监测误差定义



- 参考点
 - 在充电终止时 **SOC = 100%**
 - 在 **EDV** 时 **SOC=0**
 - 从满充电至 **EDV** 所积分的电荷为 **FCC_{true}**
- 利用这些参考点，可将真实的 **SOC** 定义如下：
$$\text{SOC}_{\text{true}} = (\text{FCC}_{\text{true}} - Q) / \text{FCC}_{\text{true}}$$
- 所有其他点上报告的 **SOC** 均可与真实 **SOC** 进行比较。
- 真实 **SOC** 与报告 **SOC** 之间的差异即为误差。它可以在放电过程中于不同的检查点上定义。

位于 0% 的检查点是没有意义的 – EDV 是系统发生崩溃时的电压！

单节电池阻抗跟踪 (IT)

误差定义和计算

- 相对电荷状态 (RSOC) 误差

$$RSOC\ Error = RSOC_{calculated} - RSOC_{reported}$$

$$RSOC_{calculated} = \frac{FCC - Q_{start} - PassedQ}{FCC} \times 100$$

($RSOC_{reported}$ 是利用 bq275xx Impedance Track™ 算法报告的 RSOC)

单节电池阻抗跟踪 (IT)

误差定义和计算

- 剩余容量 (RM) 误差

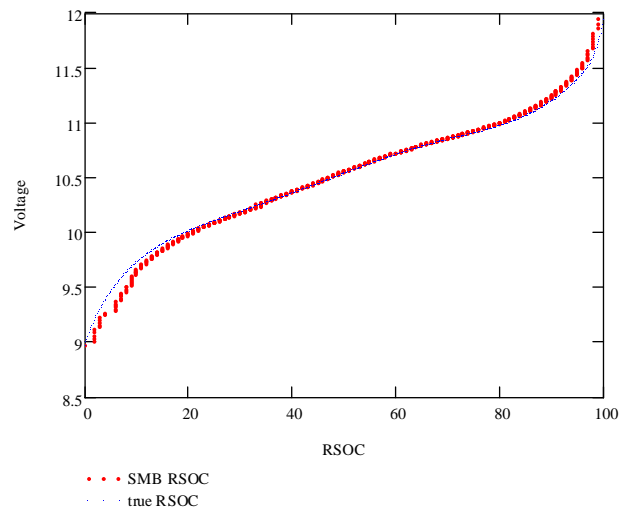
$$RM\ Error = \frac{RM_{calculated} - RM_{reported}}{FCC}$$

$$RM_{calculated} = FCC - Q_{start} - PassedQ$$

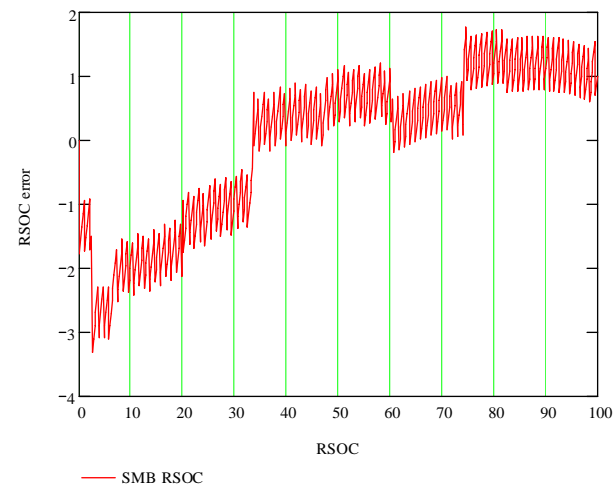
($RM_{reported}$ 是利用 bq275xx Impedance Track™ 算法报告的 RM)

误差曲线图示例

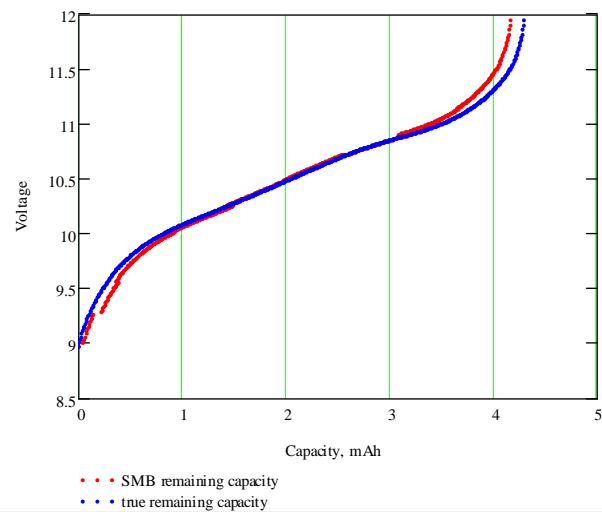
True vs reported RSOC



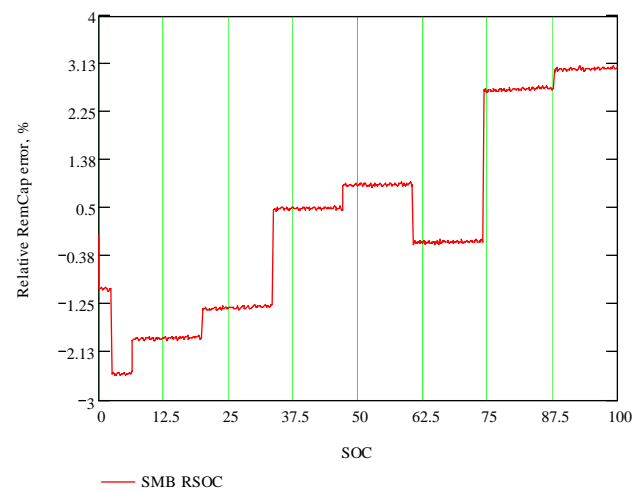
RSOC error



Remaining capacity test



Relative RemCap error



谢 谢！