

## 锂离子电池及电池电量计介绍

Li-ion Battery and Gauge Introduction

### 目录

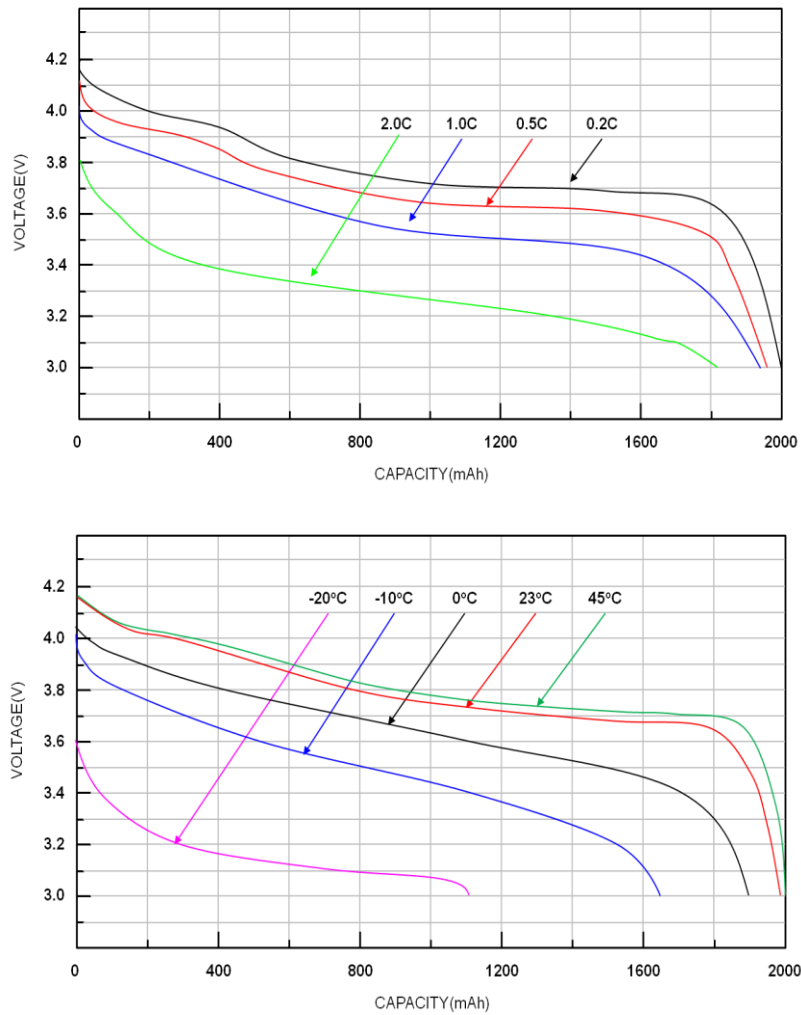
1. 锂离子电池介绍.....	1
2. 电池电量计简介.....	5
3. RT9428 电池电量计及测试.....	10

## 1. 锂离子电池介绍

### 1.1 荷电状态 (State-Of-Charge ; SOC)

荷电状态可定义为电池中可用电能的状态，通常以百分比来表示。因为可用电能会因充放电电流，温度及老化现象而有不同，所以荷电状态的定义也区分为两种：绝对荷电状态(Absolute State-Of-Charge ; ASOC)及相对荷电状态(Relative State-Of-Charge ; RSOC)。通常相对荷电状态的范围是 0% - 100%，而电池完全充电时是 100%，完全放电时是 0%。绝对荷电状态则是一个当电池制造完成时，根据所设计的固定容量值所计算出来的的参考值。一个全新完全充电电池的绝对荷电状态是 100%；而老化的电池即便完全充电，在不同充放电情况中也无法到 100%。

下图显示不同放电率下电压与电池容量的关系。放电率愈高，电池容量愈低。温度低时，电池容量也会降低。



图一、不同放电率及温度下电压与容量之关系

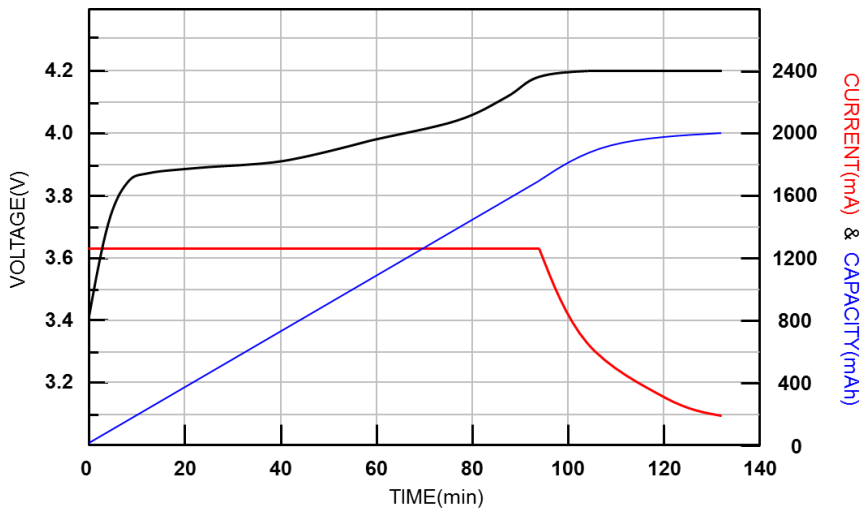
## 1.2 最高充电电压 (Max Charging Voltage)

最高充电电压和电池的化学成分与特性有关。锂电池的充电电压通常是 4.2V 和 4.35V，而若阴极、阳极材料不同电压值也会有所不同。

## 1.3 完全充电 (Fully Charged)

当电池电压与最高充电电压差小于 100mV，且充电电流降低至 C/10，电池可视为完全充电。电池特性不同，完全充电条件也有所不同。

下图所显示为一典型的锂电池充电特性曲线。当电池电压等于最高充电电压，且充电电流降低至 C/10，电池即视为完全充电。



图二、锂电池充电特性曲线

#### 1.4 最低放电电压 (Mini Discharging Voltage)

最低放电电压可用截止放电电压来定义，通常即是荷电状态为 0%时的电压。此电压值不是一固定值，而是随着负载、温度、老化程度或其他而改变。

#### 1.5 完全放电 (Fully Discharge)

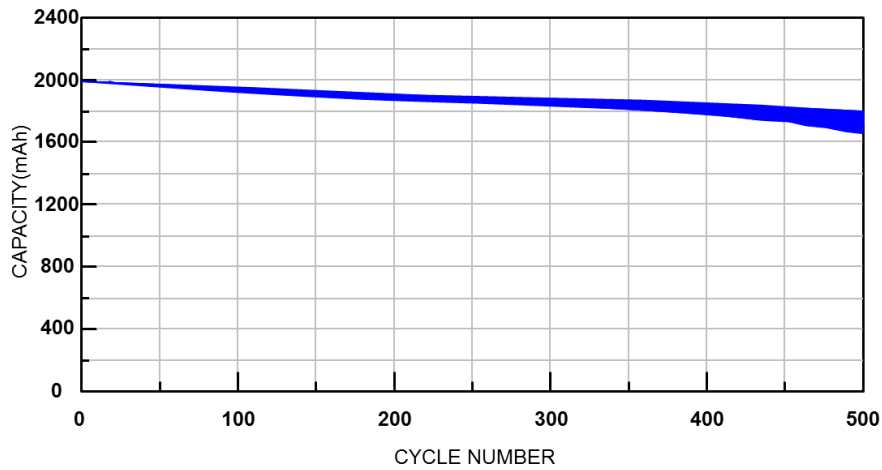
当电池电压小于或等于最低放电电压时，可称为完全放电。

#### 1.6 充放电率 (C-Rate)

充放电率是充放电电流相对于电池容量的一种表示。例如，若用 1C 来放电一小时之后，理想的话，电池就会完全放电。不同充放电率会造成不同的可用容量。通常，充放电率愈大，可用容量愈小。

#### 1.7 循环寿命

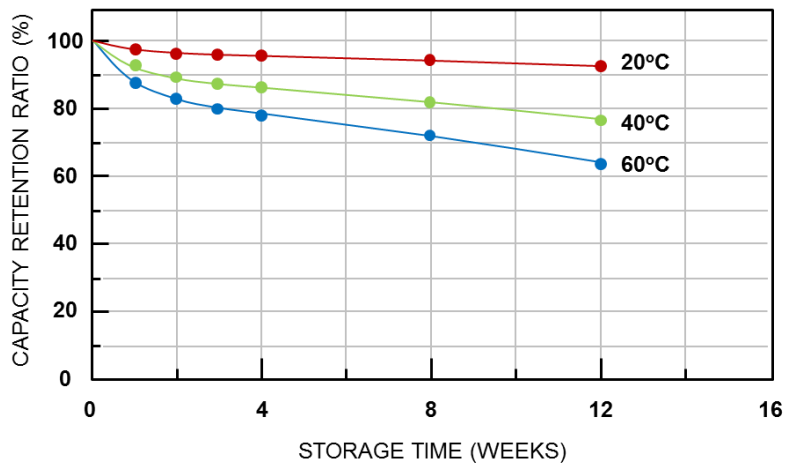
循环次数是当一个电池所经历完整充放电的次数，是可由实际放电容量与设计容量来估计。每当累积的放电容量等于设计容量时，则循环次数一次。通常在 500 次充放电循环后，完全充电的电池容量约会下降 10% ~ 20%。



图三、循环次数与电池容量的关系

### 1.8 自放电 (Self-Discharge)

所有电池的自放电都会随着温度上升而增加。自放电基本上不是制造上的瑕疵，而是电池本身特性。然而制造过程中不当的处理也会造成自放电的增加。通常电池温度每增加 10°C，自放电率即倍增。锂离子电池每个月自放电量为 1~2%，而各类镍系电池则为每月 10~15%自放电量。



图四、锂电池自放电率在不同温度下的表现

## 2. 电池电量计简介

### 2.1 电量计功能简介

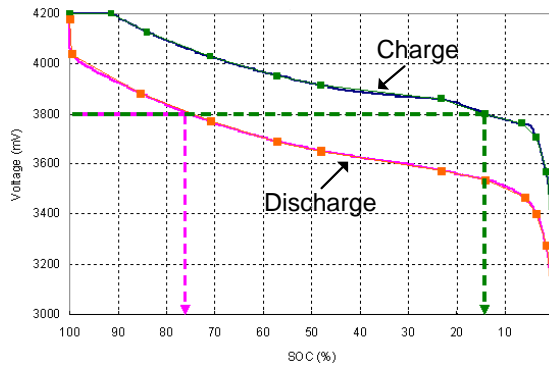
电池管理可视为是电源管理的一部分。电池管理中，电量计是负责估计电池容量。其基本功能为监测电压，充电/放电电流和电池温度，并估计电池荷电状态(SOC)及电池的完全充电容量(FCC)。有两种典型估计电池荷电状态的方法：开路电压法(OCV)和库仑计量法。另一种方法是由 RICHTEK 所设计的动态电压算法。

### 2.2 开路电压法

用开路电压法的电量计，其实现方法较容易，可借着开路电压对应荷电状态查表而得到。开路电压的假设条件是电池休息约超过 30 分钟时的电池端电压。

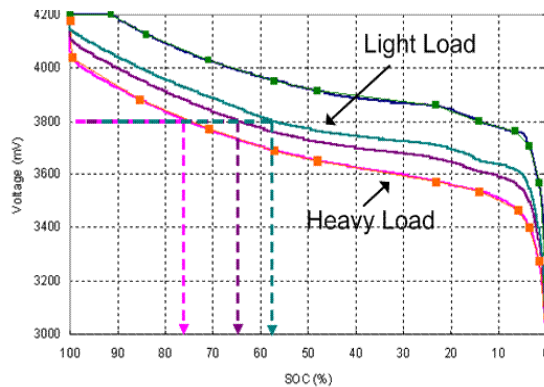
不同的负载，温度，及电池老化情况下，电池电压曲线也会有所不同。所以一个固定的开路电压表无法完全代表荷电状态；不能单靠查表来估计荷电状态。换言之，荷电状态若只靠查表来估计，误差将会很大。

下图显示同样的电池电压分别在充放电之下，透过开路电压法所查得的荷电状态差异很大。



图五、充、放电情况下的电池电压

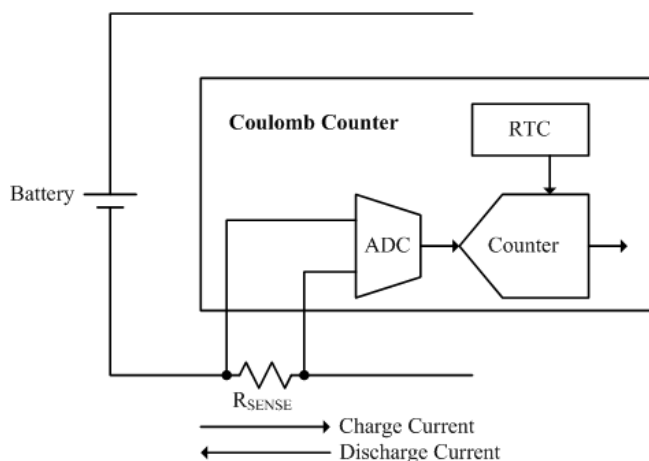
下图可知，放电时不同负载之下，荷电状态的差异也是很大。所以基本上，开路电压法只适合对荷电状态准确性要求低的系统，像汽车使用铅酸电池或不间断电源等。



图六、放电时不同负载之下的电池电压

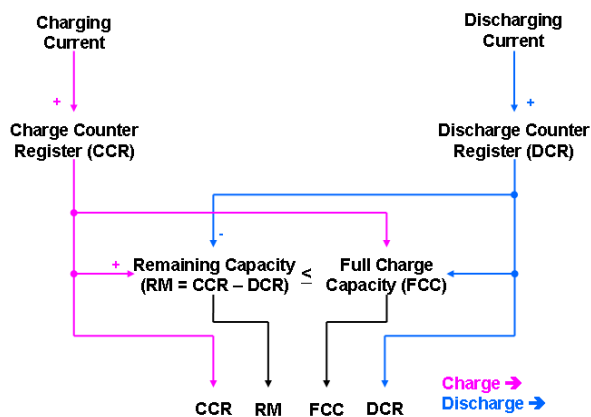
### 2.3 库仑计量法

库仑计量法的操作原理是在电池的充电/放电路径上的连接一个检测电阻。ADC 量测在检测电阻上的电压，转换成电池正在充电或放电的电流值。实时计数器（RTC）则提供把该电流值对时间作积分，从而得知流过多少库伦。



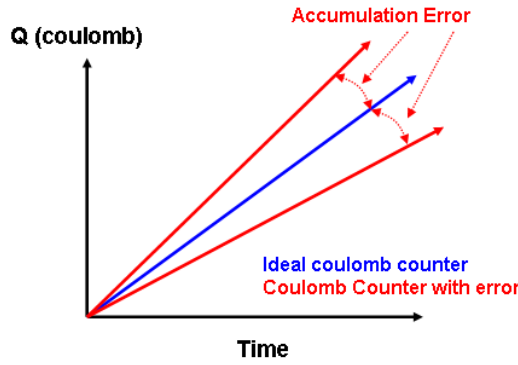
图七、库仑计量法基本工作方式

库仑计量法可精确计算出充电或放电过程中实时的荷电状态。藉由充电库仑计数器和放电库仑计数器，它可计算剩余电容量 (RM) 及完全充电容量(FCC)。同时也可用剩余电容量(RM) 及完全充电容量 (FCC) 来计算出荷电状态，即  $(SOC = RM / FCC)$ 。此外，它还可预估剩余时间，如电力耗竭(TTE)和电力充满(TTF)。



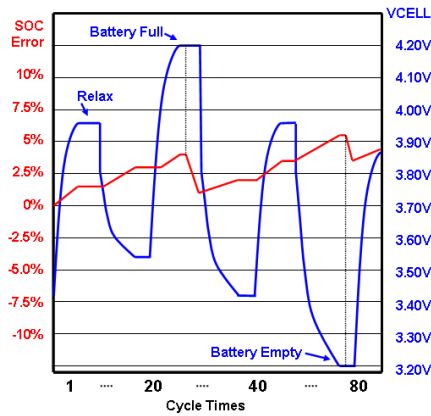
图八、库仑计量法的计算公式

主要有两个因素造成库仑计量法准确度偏差。第一是电流感测及 ADC 量测中偏移误差的累积。虽然以目前的技术此量测的误差还算小，但若没有消除它的好方法，则此误差会随时间增加而增加。下图显示了在实际应用中，如果时间持续中的未有任何的修正，则累积的误差是无上限的。



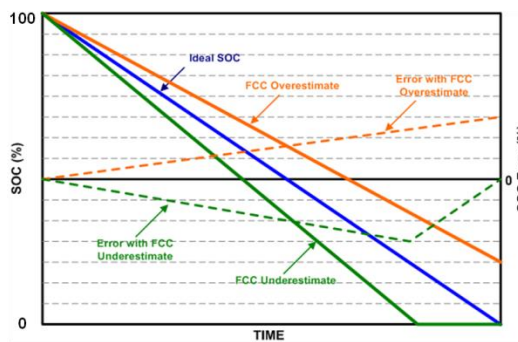
图九、库伦计量法的累积误差

为消除累积误差，在正常的电池操作中有三个可能可使用的时间点：充电结束（EOC），放电结束（EOD）和休息（Relax）。充电结束条件达到表示电池已充满电且荷电状态（SOC）应为 100%。放电结束条件则表示电池已完全放电，且荷电状态(SOC)应该为 0%；它可以是一个绝对的电压值或者是随负载而改变。达到休息状态时，则是电池既没有充电也没有放电，而且保持这种状态很长一段时间。若使用者想用电池休息状态来作库仑计量法的误差修正，则此时必须搭配开路电压表。下图显示了在上述状态下的荷电状态误差是可以被修正的。



图十、消除库仑计量法累积误差的条件

造成库仑计量法准确度偏差的第二主要因素是完全充电容量(FCC)误差，它是由电池设计容量的值和电池真正的完全充电容量的差异。完全充电容量(FCC) 会受到温度，老化，负载等因素影响。所以，完全充电容量的再学习和补偿方法对库仑计量法是非常关键重要的。下图显示了当完全充电容量被高估和被低估时，荷电状态误差的趋势现象。



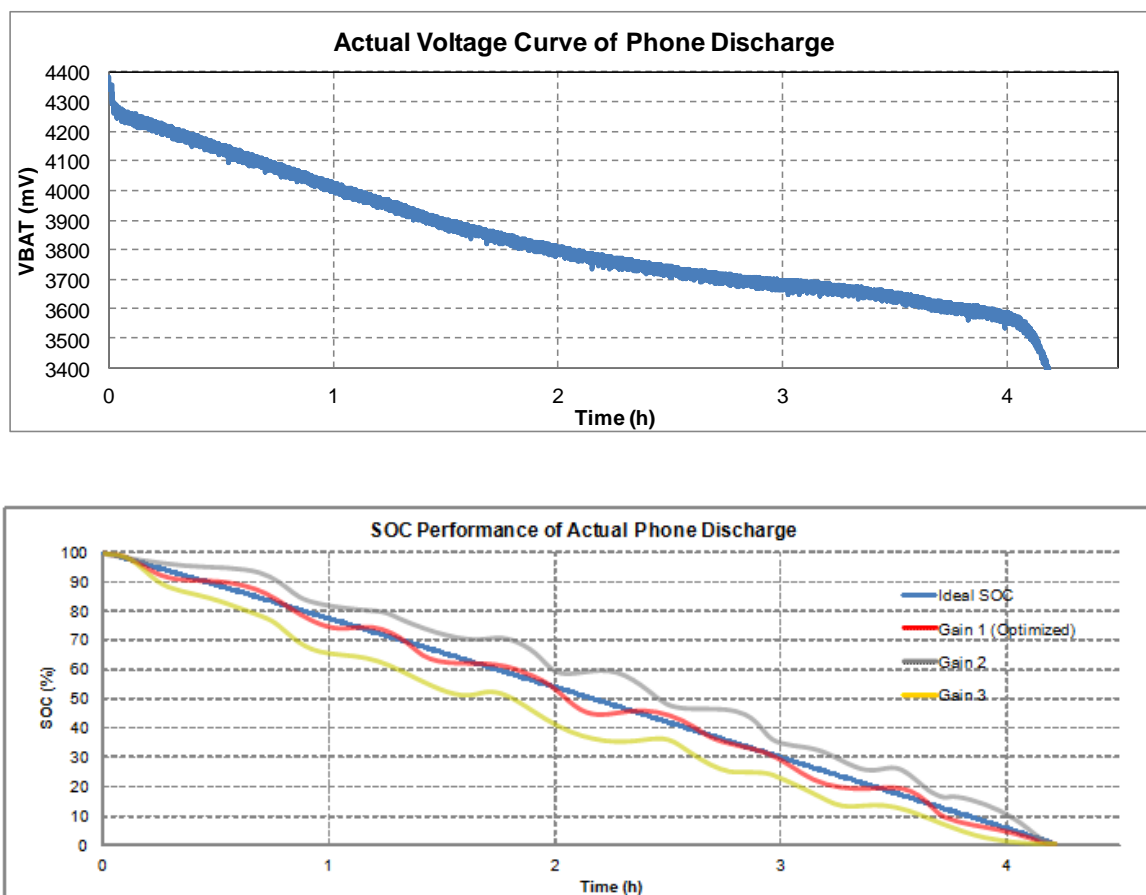
图十一、完全充电容量被高估和被低估时，误差的趋势

## 2.4 动态电压算法电量计

动态电压算法电量计仅根据电池电压即可计算锂电池的荷电状态。此法是根据电池电压和电池的开路电压之间的差值，来估计荷电状态的递增量或递减量。动态电压的信息可以有效地仿真锂电池的行为，进而决定荷电状态 SOC(%)，但此方法并不能估计电池容量值 (mAh)。

它的计算方式是根据电池电压和开路电压之间的动态差异，借着使用迭代算法来计算每次增加或减少的荷电状态，以估计荷电状态。相较于库仑计量法电量计的解决方案，动态电压算法电量计不会随时间和电流累积误差。库仑计量法电量计通常会因为电流感测误差及电池自放电而造成荷电状态估计不准。即使电流感测误差非常小，库仑计数器却会持续累积误差，而所累积的误差只有在完全充电或完全放电才能消除。

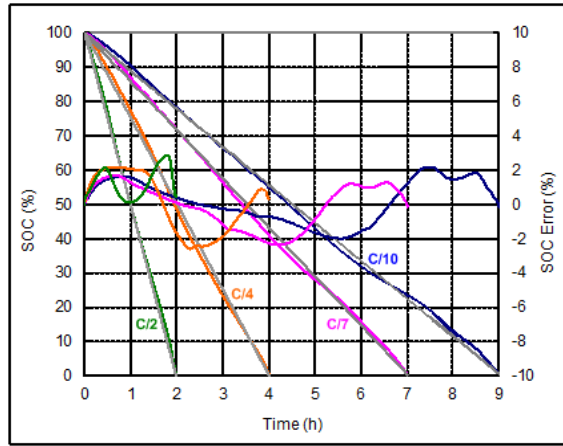
动态电压算法电量计仅由电压信息来估计电池的荷电状态；因为它不是由电池的电流信息来估计，所以不会累积误差。若要提高荷电状态的精确度，动态电压算法需要用实际的装置，根据它在完全充电和完全放电的情况下，由实际的电池电压曲线来调整出一优化的算法的参数。



图十二、动态电压算法电量计和增益优化的表现

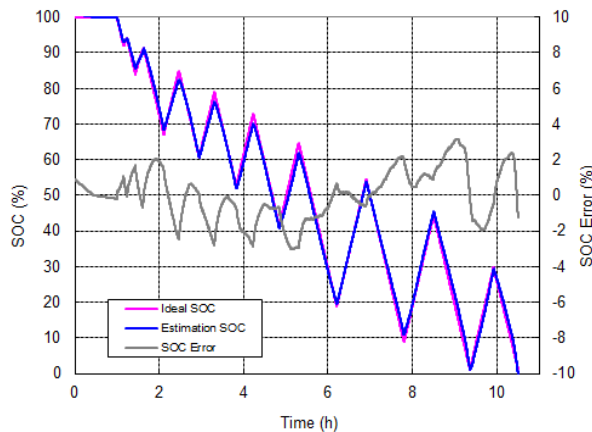


下面是动态电压算法在不同放电速率条件下，荷电状态的表现。由图可知，它的荷电状态精确度良好。不论是在 C/2，C/4，C/7 和 C/10 等的放电条件下，此法整体的荷电状态误差都小于 3%。



图十三、不同的放电速率条件下，动态电压算法的荷电状态的表现

下图显示在电池短充短放情况下，荷电状态的表现。荷电状态误差仍然很小，且最大误差仅有 3%。



图十四、在电池短充短放的情况，动态电压算法的荷电状态的表现

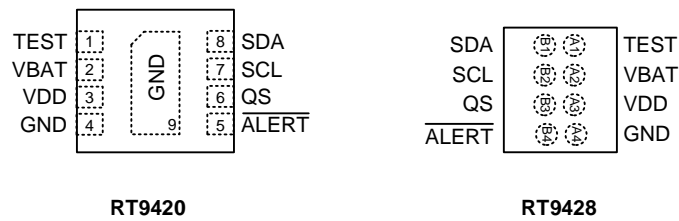
相较于库仑计量法电量计通常会因为电流感测误差及电池自放电而造成荷电状态的不准的情形，动态电压算法它不会随时间和电流累积误差，这是一个大优点。因为没有充/放电电流的信息，动态电压算法在短期精确度上较差，且反应时间较慢。此外，它也无法估计完全充电容量。然而，它在长期精确度上却表现良好，因为电池电压最终会直接反应它的荷电状态。

### 3. RT9428 电池电量计及测试

#### 3.1 RT9428 简介

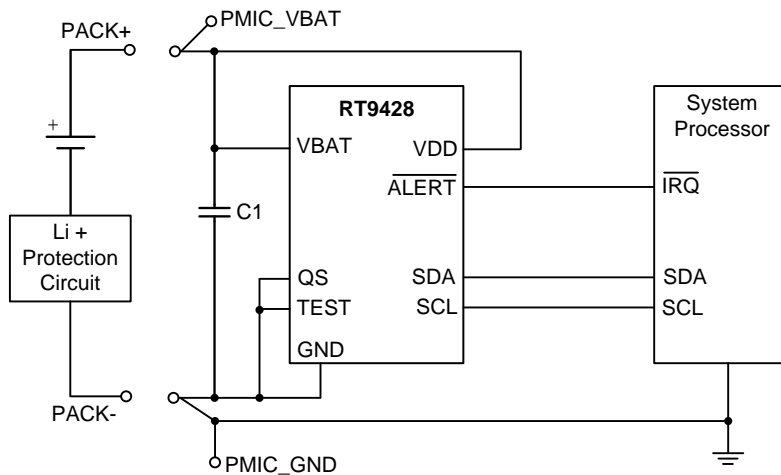
RT9428 是一用于行动装置主机侧的电量计芯片。所内置的电量计功能，计算荷电状态是根据电池电压及开路电压之间的动态差异，来估计荷电状态递增或递减量。

RT9428 和 RT9420 具有相同的功能，只是封装类型不同。RT9428 是 WL-CSP-8B1.6x1.52( BSC )的封装和 RT9420 则是 WDFN-8L 2x3 的封装。



图十五、RT9420 及 RT9428 的封装及其接脚的定义

以下为 RT9428 的应用电路，使用 RC 滤波器过滤 IC 电源供应及 VBAT 接脚电压量测上的噪声。为减少电阻造成的压降，连接时尽量使 VBAT 脚和电池靠近。当侦测到电池容量低时，ALERT 脚会提供电池低容量的中断信号给系统处理器。QS 脚在一般情况下不用，而直接接到 GND。



图十六、RT9428 的应用电路

使用动态电压算法的 RT9428 可提供稳定的荷电状态，且不会随时间和电流而有累积误差。相较于库仑计量法会因为电流感测误差及电池自放电而造成荷电状态的不准的情形，这是一个优点。下表是动态电压算法和库仑计量法两者之间的比较。

解决方案	优点	缺点
开路电压查表法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 仅须量测电压，不用感测电流</li> <li>• 电路设计较容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 动态负载时，荷电状态较不准</li> </ul>
库仑计量法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可产出剩余电容量(mAh)</li> <li>• 可产出荷电状态 SOC(%)</li> <li>• 可补偿动态负载效应</li> <li>• 单一次放电时，有较精确的 SOC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 需完全充、放电的循环</li> <li>• 需电流感测电阻</li> <li>• 有累积误差</li> </ul>
动态电压算法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不需完全充、放电的循环</li> <li>• 不需量测电流即可计算 SOC(%)</li> <li>• 没有累积误差</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 动态负载时，响应较慢</li> <li>• 不能产出剩余电容量(mAh)</li> </ul>

### 3.2 RT9428 温度补偿

根据章节 1.1，在不同温度下，电池特性也将不同。在软件驱动器来作电量计温度补偿之前，先判定在不同温度下的电池参数，一般温度是选在 5/25/45°C 之下。然后，软件驱动器会周期性地检查系统的温度，再根据温度把对应的参数(VGCOMP)写回 RT9428。以下为软件程序代码可为参考。

```

// RT9428 software driver
// optimization pre-defined battery parameters
RT9428_VGCOMPL=[0x32, 0x0F, 0x05, 0xFE];
RT9428_VGCOMP=[0x0F, 0x3A, 0x35, 0x91];
RT9428_VGCOMP=[0x41, 0x3A, 0x82, 0x69];

// temperature compensation
temperature = get_system_temp_origin();
if (temperature >= 45)
    vgcomp = RT9428_VGCOMP;
else if (temperature <= 5)
    vgcomp = RT9428_VGCOMPL;
else
    vgcomp = RT9428_VGCOMP;

// upload FG parameters into RT9428
rt9428_vgcomp_write(vgcomp);
    
```

图十七、RT9428 软件驱动器的程序代码

### 3.3 测试条件

定义：

**理想的荷电状态：**荷电状态是测试完成后，根据实际充放电容量及完全容量计算而来。理想的荷电状态在测试完成后只能重新计算，因为实际的放电容量是在放电完成后才计算出来的。

**荷电状态：**电量计回报的荷电状态

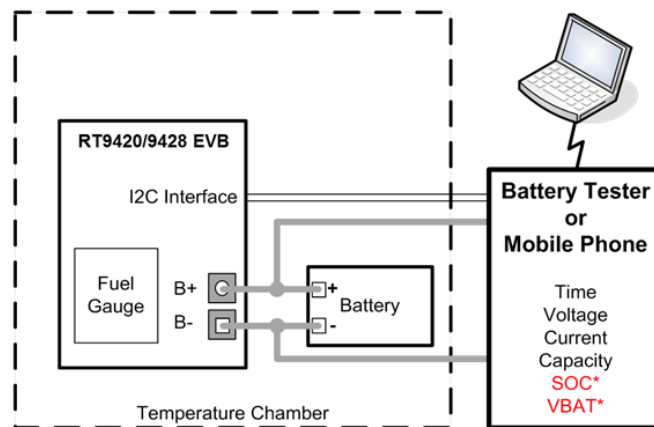
**完全充电容量：**完全充电容量在测试完成后是透过电流对时间来积分计算出来的

**荷电状态误差：**计算的荷电状态和理想的荷电状态之间的差异

以下为测试 RT9420/RT9428 电量计功能的各种条件：

- 定电流放电、充电测试
- 定功率放电测试
- 实际手机测试

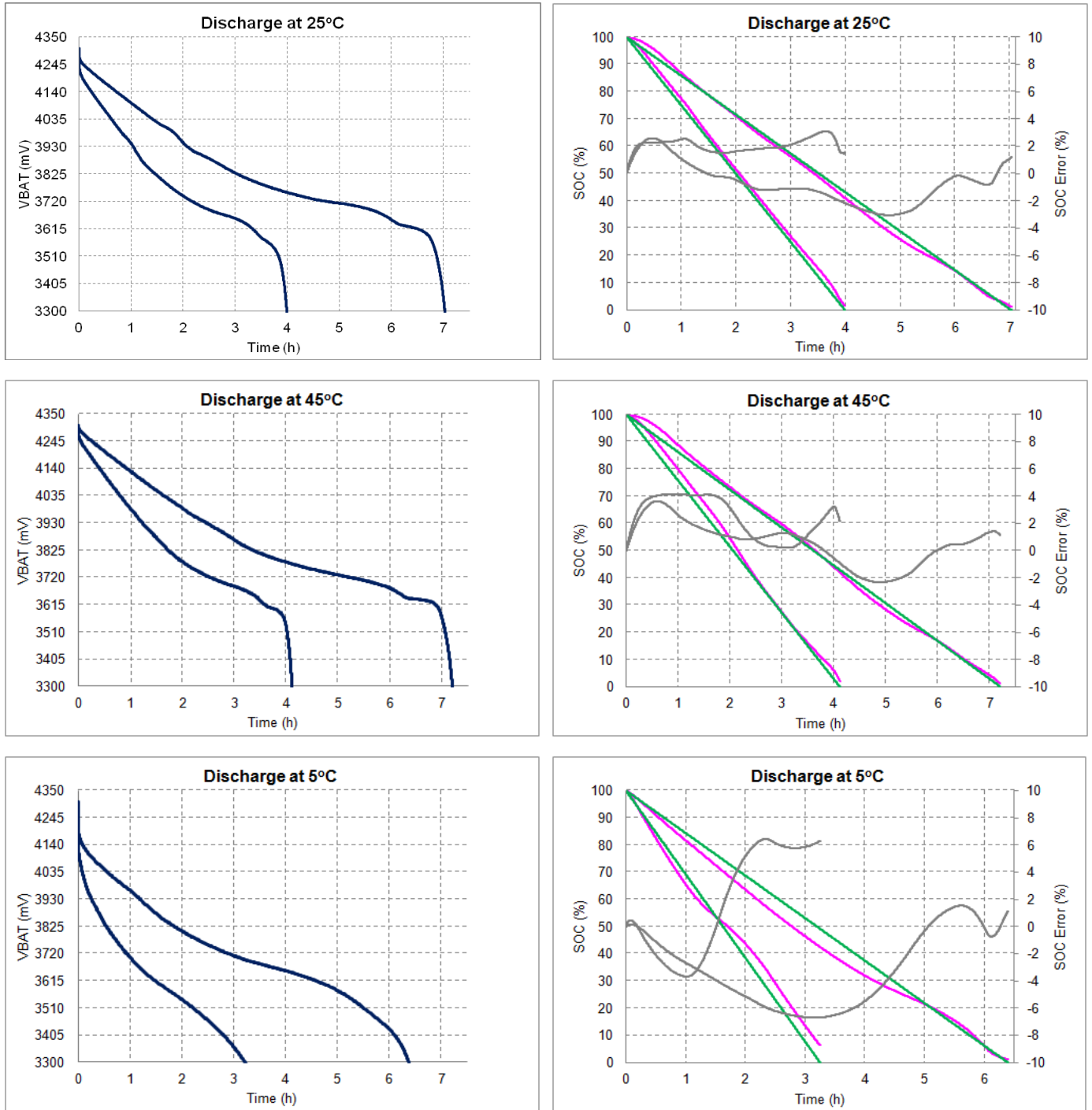
测试的方块示意图



图十八、从电量计透过 I<sup>2</sup>C 界面和测试器或手机存取 SOC，VBAT

3.4 定电流放电测试范例

测试以确认电量计可提供在不同负载、温度条件下准确的荷电状态回报。测试条件为以 C/4、C/7 定电流放电，直至电压降至 3.3V，温度分别在 5/25/45°C 下。

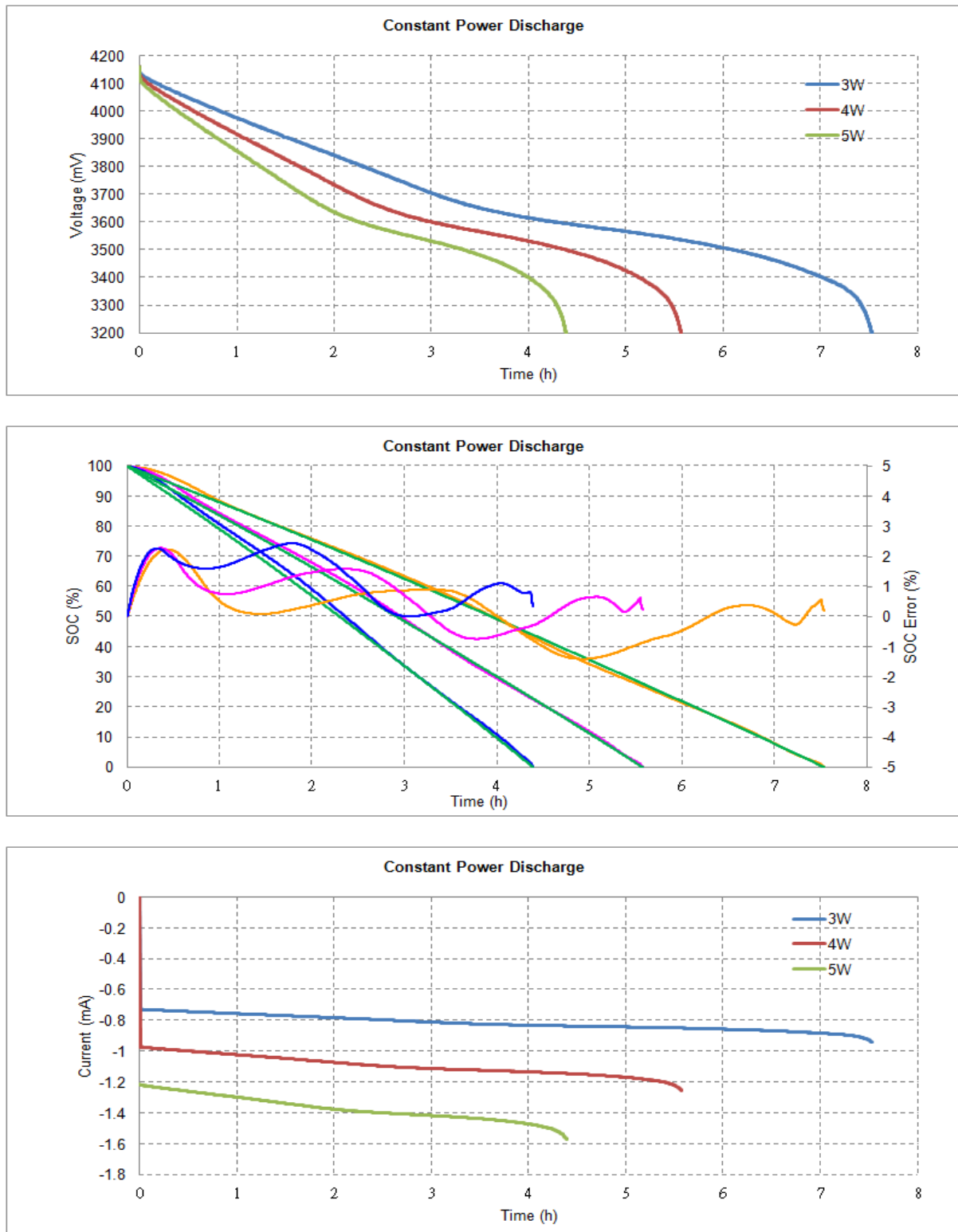


图十九、定电流放电的测试结果

### 3.5 定功率放电测试范例

在不同负载下，电量计可提供精确的荷电状态回报。

测试条件：分别为 3W、4W、5W 的定功率放电，直至电压降至 3.2V。



图二十、定功率放电测试结果

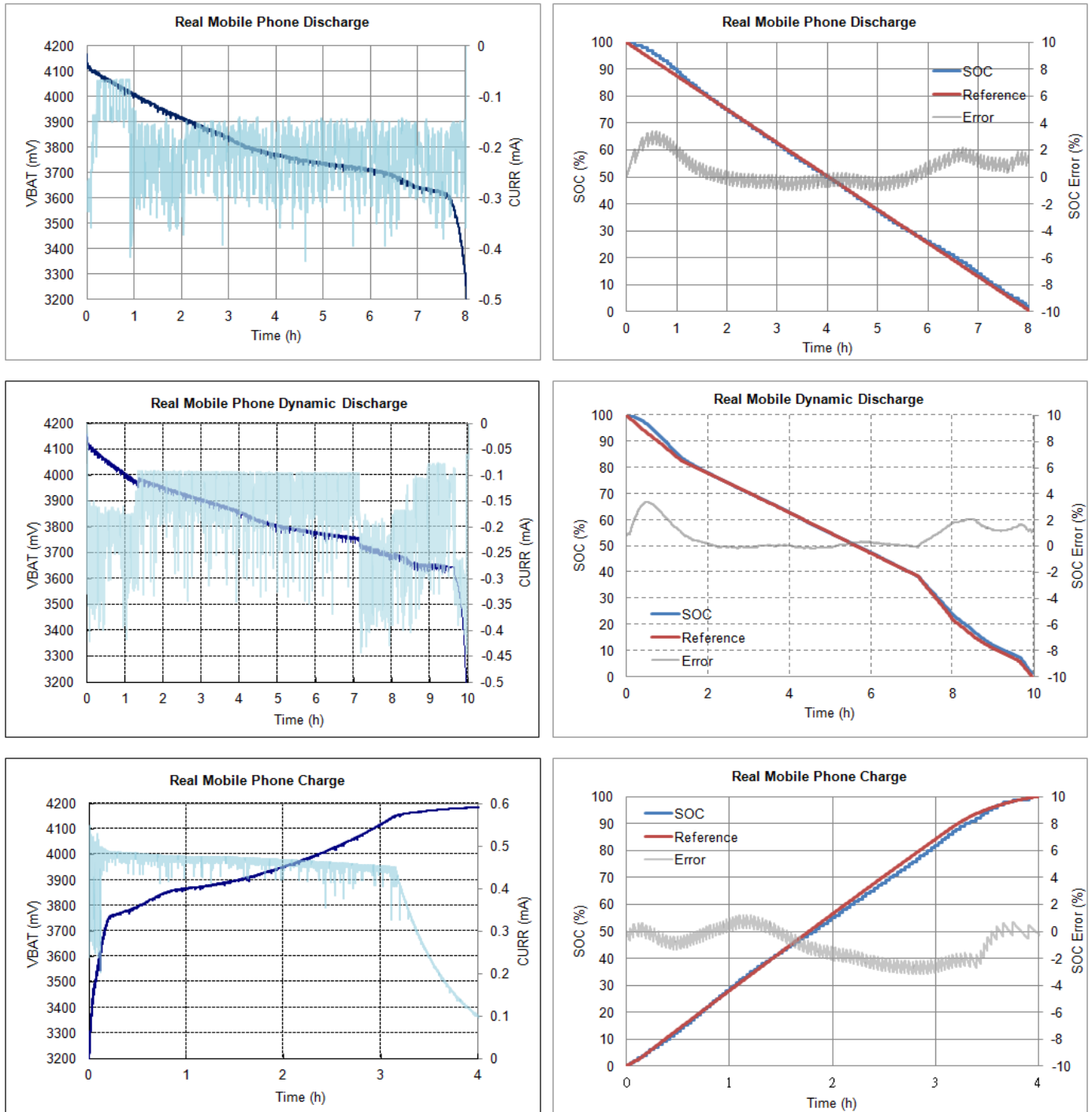
3.6 实际手机测试范例

用实际手机作测试，电量计可提供精确的荷电状态。

测试条件：

动态及正常放电直到手机自动关机状态。

正常充电直到手机自动停止充电。



图二十一、实际手机测试结果

相关产品		
<a href="#">RT9428</a>	Host-Side Single Cell Lithium Battery Gauge	 <a href="#">Datasheet</a>

相关资源	
立锜科技电子报	<a href="#">订阅立锜科技电子报</a>
档案下载	<a href="#">PDF 下载</a>
相关应用	<a href="#">Battery Management</a>

**Richtek Technology Corporation**

14F, No. 8, Tai Yuen 1<sup>st</sup> Street, Chupei City  
 Hsinchu, Taiwan, R.O.C.  
 Tel: 886-3-5526789

Richtek products are sold by description only. Richtek reserves the right to change the circuitry and/or specifications without notice at any time. Customers should obtain the latest relevant information and data sheets before placing orders and should verify that such information is current and complete. Richtek cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Richtek product. Information furnished by Richtek is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Richtek or its subsidiaries for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Richtek or its subsidiaries.