

# 超级电容的应用设计探讨

备份电源

# 目录

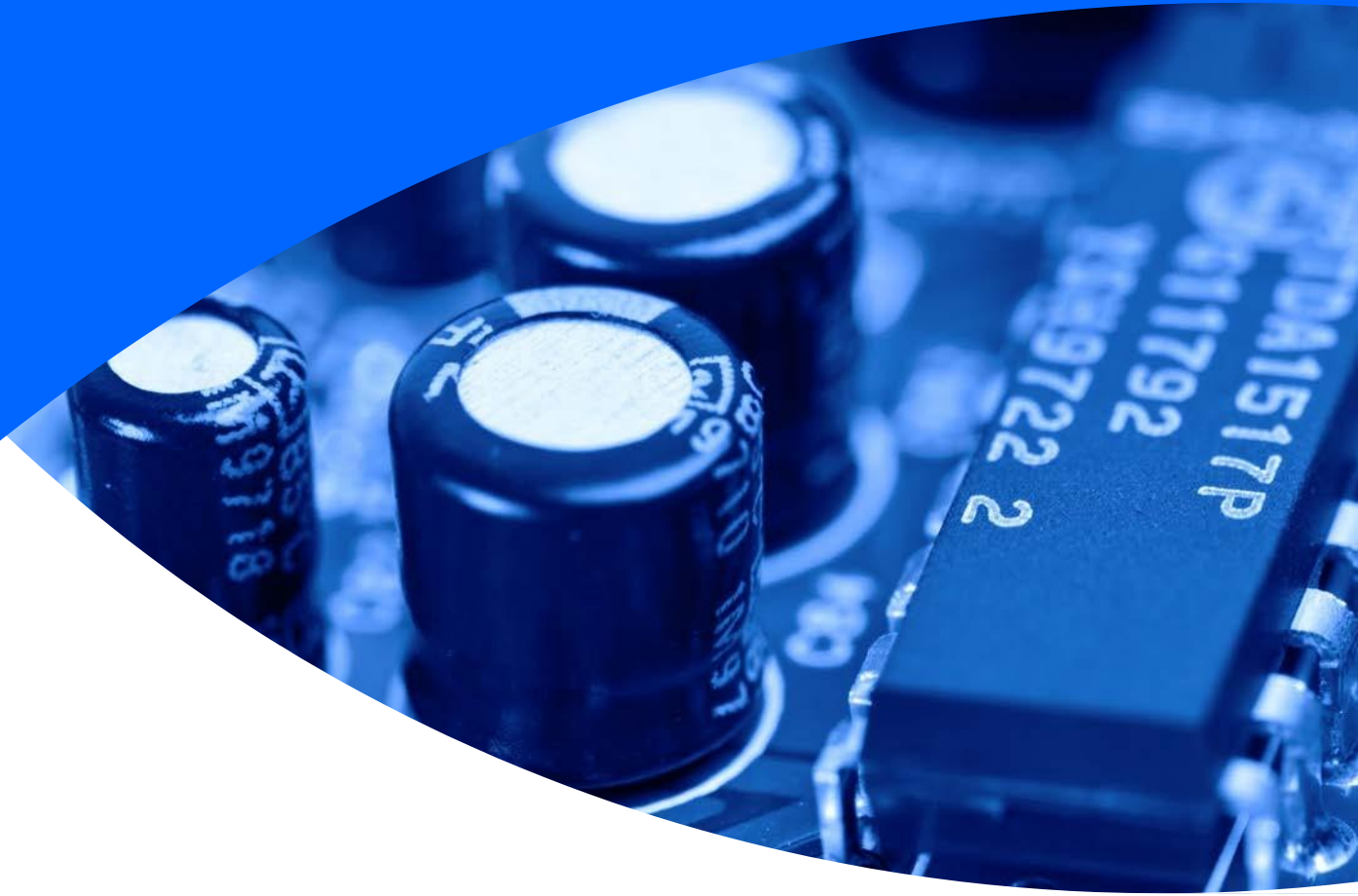
使用超级电容的设计

备用能源模块（BEM）的设计理念

超级电容的容值选择

如何直接计算超级电容的容值

结论



## 使用超级电容的设计

很多应用场景都需要备用电源，而且不同应用选用的备用电源差异也很大。例如将笔记本电脑外部电源转换为电池电源时 RTC 的备用电源，只需要极少的能量且仅需支持极短的时间（几毫秒）。而另一个极端的示例是整个家庭的备用电源。从几个小时到几天，整个家庭的电源备份需要在更长的时间内提供千瓦级的电力。

为了充分规划备份系统，首先需要考虑的问题是备份电源的持续时间需求是多久。电力服务中断时，是需要备份电源长时间持续供电来确保整个家庭或整个工厂楼层继续运行？还是就像电脑备份电源系统那样，仅仅用于在 AC 电源丢失时通知用户并保存他们的工作数据然后再关闭系统？了解所需的持续时间将有助于确定备份电源的类型。

帮助确定最佳备份电源的第二个问题是断电期间需要做多少功。之所以提到功是因为这有助于在能量

和功率之间实现轻松转换。

Ragone 图是一个用于描述电化学存储系统（如电池）中能量和功率之间权衡的工具。它显示了 Y 轴上的能量密度（通常以 Wh/kg 为单位）与 X 轴上的功率密度（通常以 W/kg 为单位）之间的双对数（log-log）关系。由于是双对数坐标图，放电时间可以表示为直线对角参数。图 1 所示的 Ragone 图说明不同类型的电源有不同的能量及功率能力。

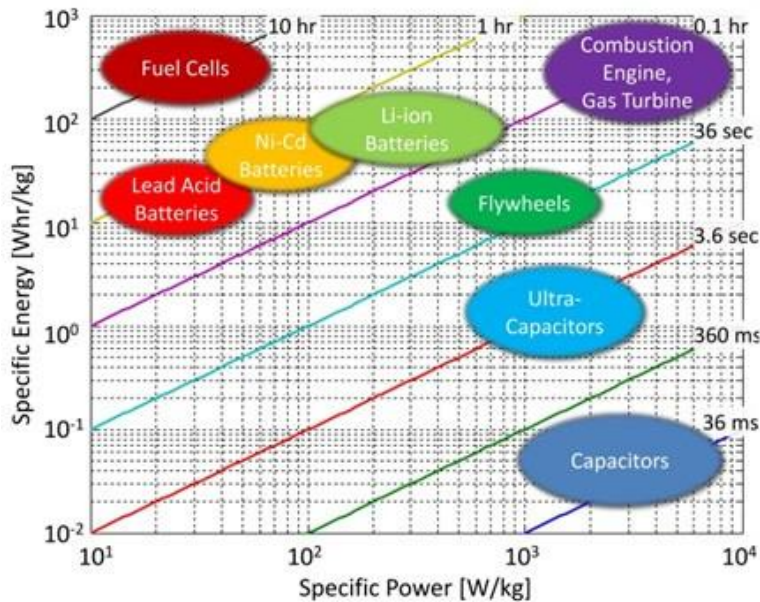


图 1: Ragone 图说明了几种电源之间功率与能量的关系（图片来源: Researchgate）

从图 1 可以看出，平衡功率输出与所供能量的最佳整体解决方案是内燃机，它无疑是需要大功率且长时间备份系统的最佳电源方案。

当应用可同时使用电池和超级电容时，做出选择就得仔细斟酌。这类应用就需要提出第三个问题来确定最佳整体解决方案，即电源的可访问性和可维护性要求。

电池和超级电容在耐用性和安全性方面存在显著差异。超级电容在充放电循环次数上远优于电池，而且天生没有热失控的风险。热失控是锂离子电池的一个特征，可能会导致发生灾难性火灾和电池爆炸。

## 备用能源模块（BEM）的设计理念

BEM 的概念可适用于很多场景，本应用手册以 JEDEC 标准中内存器件的备份能源模块标准（JESD5, Backup Energy Module Standard for NVDIMM Memory Devices (BEM), 2021）为参考，重点讨论备份电源的设计理念。

JESD 规范主要强调存储阵列卡及其相关电源需求的备用电源，但这一规范可以扩展到任何所需的功率和能量水平。使用大型超级电容可以支持非常高的充放电电流，这可能会超出当前规范所涵盖的范围。

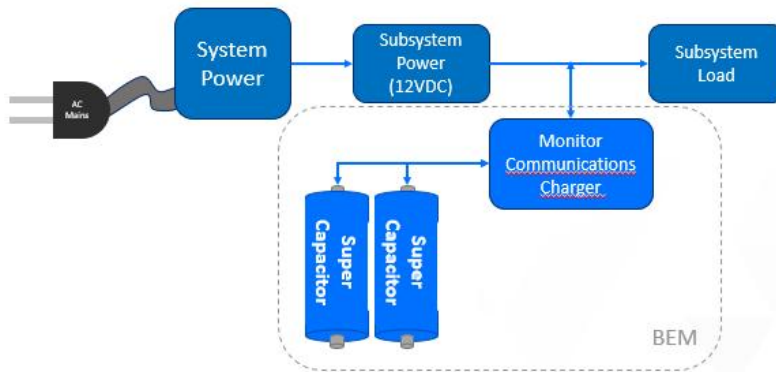


图 2：采用超级电容的备用能源模块的概念原理图

# 超级电容的容值选择

选择正确的超级电容容值需要对需要备用电源的负载进行特征描述。首先，需要明确需要完成的总工作量以及时间范围。接下来需要分析超级电容参数，包括电容容量、额定电压、最大充放电电流、等效串联电阻（ESR）和额定工作温度。

为了简单起见，假定负载为恒定 20 瓦。JESD315 规范规定，BEM 需要支持该负载至少 30 秒。在本示例中，我们将使用 180 秒。也就是说，在我们的示例中，总功（能量）等于：

$$E = \text{功率} * \text{时间}, \text{ 其中功率的单位是瓦特, 时间的单位是秒}$$

$$\text{如果 } 1 \text{ 瓦特} = 1 \text{ 焦耳/秒, 那么, } 20 \text{ 瓦特就} = 20 \text{ 焦耳/秒}$$

$$E = 20 \text{ 焦耳/秒} * 180 \text{ 秒}$$

$$E = 3600 \text{ 焦耳}$$

JESD315 规范规定，初始状态所需的最小能量为 300 焦耳，因此我们的示例是符合规范的。

已知以焦耳为单位的功，因此可使用以下方程根据总能量（功）以及超级电容的工作电压计算电容：

$$\text{存储的能量: } E = \frac{1}{2} * C * V^2 \text{ (焦耳)}$$

使用工作电压为 4.2V 的超级电容产品系列，求解 C。

$$C = 2 * E / V^2$$

$$C = 2 * 3600 / (4.2)^2$$

$$C \approx 408 \text{ 法拉}$$

在理想情况下，最低 408 法拉的电容足以在 3 分钟内提供 20W 的备用电源。实际需要的电容要大得多。原因是这些方程没有考虑到电源的实际限制条件——放电电流和总容量。

与所有实际电源一样，超级电容的放电电流不可能无限大。在本示例中，负载需要恒定的 20W 功率。功率等于电压乘以电流。电容放电时，电压会成比例地下降。当电压降低时，电流必须成比例地增加，才能保持 20W 的功率。意味着在电容的电压接近零时，电流会接近无穷大！为防止超级电容自毁，需要对放电电流设置一个限值对其进行限制。

图 3 是基于超级电容的真实放电曲线，该超级电容几乎比我们之前的理想计算值大 10 倍。其原因在我们的示例讨论中已清晰明了。

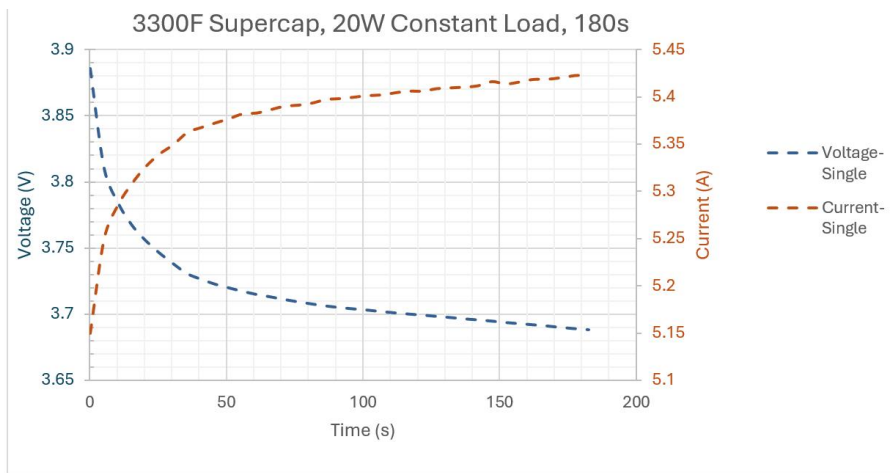


图3: 在 20W 的恒定负载下，电压和电流随时间变化的关系图。

第二个实际限制（总可用容量）与第一个实际限制（最大放电电流）密切相关。在实际应用中，我们往往无法完全利用超级电容的全部容量。在保持恒定功率（如 20W）的同时，我们需要确定超级电容在不超其最大放电电流的情况下所能达到的最低允许电压。超级电容的总可用容量是指在其起始电压和终止电压之间可以存储的电荷量。

在考虑超级电容的容量时，可以通过其最大放电电流来反推其在不超过规格限制的情况下，超级电容可以放电到的最低电压。

继续前面示例的探讨，假设我们计算所得的 408F 超级电容能支持的最大放电电流是 6A。根据功率方程 ( $P=U*I$ )，放电周期将从放电电流 4.76A ( $I = 20W/4.2V$ ) 开始，放电电流增加到 6A 时结束，此时电容电压为 3.3V ( $20W/6A$ )。放电的时间可用以下恒定功率方程计算：

$$T_{\text{discharge}} = (1/2P) * C * (V_{\text{start}}^2 - V_{\text{min}}^2), \text{ 其中 } V_{\text{start}} = 4.2V, V_{\text{min}} = 3.3V$$

$$T_{\text{discharge}} \approx 68s, \text{ 其中我们的目标是 } 180s$$

这将计算得出大约 1360 焦耳的功，其中我们的目标是 3600 焦耳。由于超级电容的放电电流限制，可用容量显著降低。

影响超级电容可用容量的另一个实际特征是其内阻。如前文所述，DC 应用的超级电容将这个称为等效串联电阻 ESR。

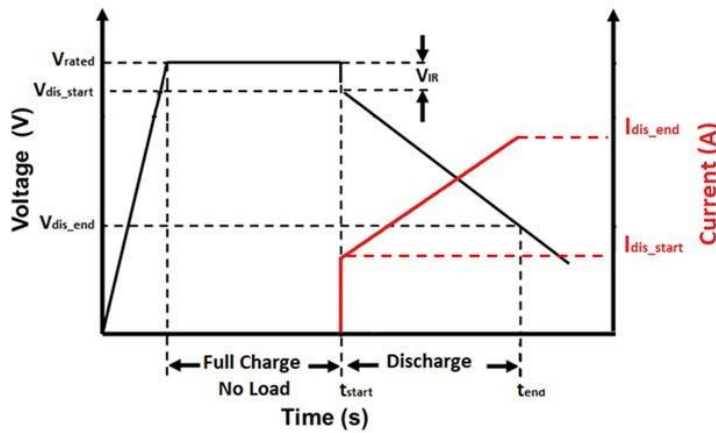


图 4: 受 ESR 影响的放电曲线图

图 4 中  $V_{\text{IR}}$  是由超级电容 ESR 引起的压降。因此，在我们的示例中，起始电压不是 4.2V。压降为  $V_{\text{drop}} = \text{ESR} * I_{\text{discharge}}$ 。放电起始电流为 4.76A，典型超级电容  $\text{ESR} \times 2 = 0.018 \Omega * 2 = 0.036 \Omega$ 。这可计算得出： $V_{\text{drop}} \approx 0.17V$ ，起始放电电压 ( $V_{\text{dis\_start}}$ ) 为 4.03V。这意味着放电周期内超级电容放电时间更短，可提供的功率更少。



根据上文推导，之前计算出的超级电容容值为 408 法拉在现实设计中是不可行的。而且上述示例还没有考虑超级电容的容差以及与工作电压和环境温度相关的使用寿命等因素，这些都会影响容值的选择。

## 如何直接计算超级电容的容值

对于一些读者来说，如何为给定负载精确确定超级电容的容量可能正在变得越来越清晰。本节就将把所有问题汇集在一起最后得出解决方案。下一个示例将采用前面的负载要求，首先考虑实际应用的限制条件展开分析，最后基于这些条件来推荐合适的超级电容容值。

在本示例中，负载保持为 20W；因此，3600 焦耳的总能量或功的焦耳计算仍然适用。

第一个考虑因素是额定的最大放电电流。与之前一样，计算得出最小允许放电电压为 3.3V，以使放电电流未超过 6A 的规范。

考虑到 ESR  $V_{IR}$  (0.17V) 的最坏情况，放电周期的起始电压现在为 4.03V。可使用恒定功率方程按照时间 (180 秒) 和电压的函数求出电容：

$$T_{\text{discharge}} = (1/2P) * C * (V_{\text{start}}^2 - V_{\text{min}}^2)$$

$$C = (180s * 2 * 20) / (V_{\text{start}}^2 - V_{\text{min}}^2)$$

$$C \approx 1340 \text{ 法拉}$$

这时，最好将超级电容的容差计算在内。产品说明书将电容指定为“典型值”，因此，我们需要将电容加入计算值。对于这里的示例，超级电容支持±20%的容差。为了补偿最坏情况，1340F 的电容必须增加 20%，即总量为 1675F。

Abracon 之前发布了关于超级电容的应用手册。其中在标题为《超级电容与电池的比较》的应用手册中提到电池和超级电容都对高温很敏感，高温会显著降低组件的耐用性或使用寿命。在标题为《超级电容使用寿命说明》的应用手册中，介绍了通过降低工作电压额定值来增加超级电容使用寿命和耐用性。读者可参阅这些应用手册来了解更多详情。

继续我们的示例，BEM（此处为超级电容）被安装在一个带有主动冷却系统的刀片服务器中，该系统能够将机箱内的环境温度维持在最高 60° C。而所选的超级电容的工作温度范围是-20° C 到+60° C。由于最高环境温度正好是超级电容的最高工作温度，我们需要做进一步分析来确保设计可靠性。

温度会影响超级电容的耐用性或使用寿命。在更换或报废之前，BEM 的预计工作时间是多久？就我们的示例而言，将使用两年。

在超级电容的应用中，通常认为当电容的容量下降到其原始容量的 70%（即减少了 30%）时，其寿命被认为是“到期”的。也就是说，如果超级电容在其两年的使用寿命结束时估量正确，所能存储的能量将比原始容量减少 30%。在前面的计算中，我们只考虑了超级电容的最坏情况容差，而没有为整个系统的寿命或性能下降预留任何设计裕量。对于 2 年的使用寿命而言，这通常是不够的。最便捷的补偿方法是为 1675F 增加 30%，选取 2297F 的超级电容。

但还没有完！另一个行业标准是将超级电容在其额定温度及电压下工作的使用寿命指定为 1,000 小时。这相当于连续工作一个多月的时间而已，对于实际应用而言实在是太短时间了。听到这个消息是不是想发飙？不要愤怒！接下来我们将讨论如何设计保证超级电容可以工作更长时间。

在给定额定电压、额定温度和 1,000 小时使用寿命的情况下，可通过降低电压和/或工作温度的额定值来延长使用寿命。这里的示例需要 60°C 的环境温度，因此无法提供降低超级电容温度额定值的空间。唯一的选项是降低额定电压。要实现两年的使用寿命，电压需要降额至大约 3.6V。这会使总放电周期处于 3.6V 和 3.3V 之间。回顾一下，3.3V 是允许的最小电压，可使放电电流不超过超级电容的电流额定规范。

再根据这个方程对 C 进行求解，

$$C = (180s * 2 * 20) / (V_{start}^2 - V_{min}^2)$$

电容的电容值必须约为 **3500 法拉**，才能考虑电压降额。**3500F** 的电容值表示在其使用寿命“结束”时仍然工作所需的电容。这个电容值没有考虑超级电容的容差以及 **30%** 的使用寿命降级。考虑这些因素之后，投入使用时总电容需要达到约 **6250 法拉**。有关超级电容老化如何影响可用容量及 **ESR** 的更多信息，请参阅标题为《超级电容使用寿命说明》的应用手册，了解有关降额超级电容的更多详情。



## 结论

希望本应用手册已经阐明了使用超级电容来设计备份电源的复杂性。在设计过程中，最好参考超级电容产品规格书中给出的实际限制，并将其应用于之前提到的方程中。

最初我们计算得出可能需要一个 408 法拉 (F) 的超级电容，但经过全面分析后，对于需要持续 180 秒供电 20 瓦、且实际使用寿命为 2 年的应用来说，最佳解决方案是一个 6250 法拉的超级电容器，其容量几乎是前者的 15 倍。

这就带来了一个问题，6250F 超级电容的物理尺寸比 408F 超级电容大多少？由于无法直接找到 408 法拉的超级电容器，我们需要将其四舍五入到下一个更高的标准容量，即 470 法拉。据估计，470F 超级电容的尺寸约为  $\text{Ø}16\text{mm} \times 34\text{mm}$ ，而 6250F 超级电容的尺寸约为  $\text{Ø}24\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。两者均为圆柱形，也就是说体积差异大约 5 倍。

下面是准确确定超级电容尺寸的推荐流程。步骤的顺序可能因应用而异。

1. 准确描述负载特征。第一步对所有后续步骤都至关重要。计算出所需的功或存储能量，适当增加设计余量以补偿电路效率变化产生的影响，例如 DC/DC 效率。请记住，DC/DC 转换器（如 Boost 电路）的效率并不是恒定的，它通常会随着输入电压（在这里指超级电容的电压）的下降而降低。
2. 计算不超过额定电流情况下所允许的最小电容电压。使用“最坏情况”下的功率来补偿负载波动，以及通过调整额定电流一定百分比以增加设计裕量。
3. 降低充电电压和/或环境温度额定值，以达到所需使用寿命预期。
4. 计算 ESR 压降后的电压来确定起始电压。在此计算中使用的 ESR 应该是产品规格书该值的 2-3 倍，以补偿超级电容的老化效应。
5. 使用  $C = (t * 2 * P) / (V_{start}^2 - V_{min}^2)$  计算备份持续时间所需的电容，其中 t 以秒为单位，P 以瓦为单位。
6. 增加一定比例的容差以适应最坏情况。
7. 增加电容容值以适应超级电容在使用寿命期间的退化，通常为 30%。
8. 最后，要检查我们的计算并验证使用寿命结束时电容（此时容值为 3500F）是否可提供足够的能量。

消耗能量=放电前存储能量-放电后存储能量

放电前存储能量= $\frac{1}{2} * C * V_{start}^2 = \frac{1}{2} * 3500 * (3.6V)^2 = 22,680$  焦耳

放电后存储能量= $\frac{1}{2} * C * V_{min}^2 = \frac{1}{2} * 3500 * (3.3V)^2 = 19,058$  焦耳

消耗能量 $\approx 3623$  焦耳

最初的要求是 3600 焦耳，所以这是可行的！

图 5 是所有计算参数的汇总，并在以下放电曲线图中进行了说明：

5500F 超级电容：  
 $V_{rated} = 4.2V$   
 $I_{max} = 6A$   
 $ESR = 0.025 \Omega$   
 使用寿命 = 两年  
 负载：  
 20W 恒定功率负载

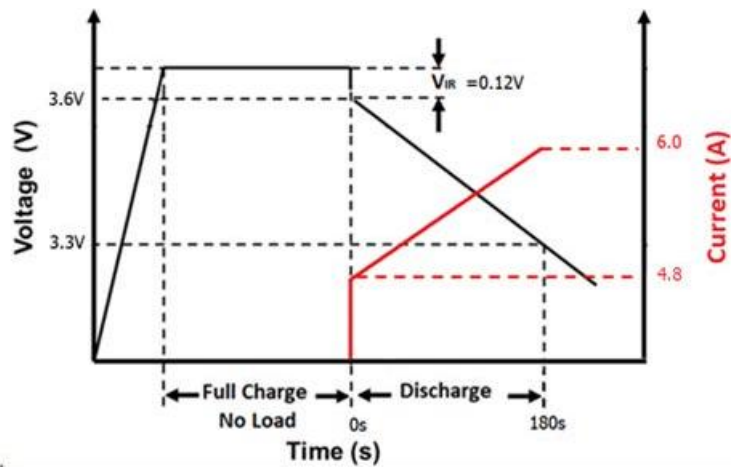


图 5：基于应用手册示例中计算值的放电曲线图