

非常见问题第179期: 使用超级电容储能: 多大才足够大?

Markus Holtkamp, 战略营销总监;
Gabino Alonso, 现场应用工程师

问题:

为备用电源系统选择超级电容时, 可以采用简单的能源计算方法吗?



答案:

简单的电能计算方法可能达不到要求, 除非您将影响超级电容整个生命周期的储能性能的所有因素都考虑进去。

简介

在电源备份或保持系统中, 储能媒介可能占总物料成本 (BOM) 的绝大部分, 且占据大部分空间。优化解决方案的关键在于仔细选择元件, 以达到所需的保持时间, 但又不过度设计系统。也就是说, 必须计算在应用使用寿命内满足保持/备份时间要求所需的储能能量, 而不过度储能。

本文介绍考虑超级电容在其使用寿命期间的变化, 在给定保持时间和功率下选择超级电容和备用控制器的策略。

静电双层电容 (EDLC) 或超级电容 (supercaps) 都是有效的储能设备, 可以弥补更大更重的电池系统和大容量电容之间的功能差距。相比可充电电池, 超级电容能够承受更快速地充放电周期。因此在电能相对较低的备用电源系统、短时充电系统、缓冲峰值负载电流系统和能量回收系统中, 超级电容用于短期储能比电池更好 (参考表1)。在现有的电池-超级电容混合系统中, 超级电容的高电流和短时电源功能是对电池的长持续时间、紧凑储能功能的有效补充。

表1. EDLC和锂离子电池之间的比较

特性	超级电容	锂离子电池
充电/放电时间	<1 s至>10 s	30分钟至600分钟
端电极/过度充电	—	是
充电/放电效率	85%至98%	70%至85%
生命周期	100,000+	500+
最低至最高电池电压 (V)	0至2.3*	3至4.2
比能量 (Wh/kg)	1至5	100至240
比功率 (W/kg)	10,000+	1000至3000
温度 (°C)	-40°C至+45°C*	0°C至+45°C充电*
自放电速率	高	低
本质安全	高	低

*为了保持合理的使用寿命

需注意, 超级电容承受高温和高电池电压会缩短超级电容的使用寿命。必须确保电池电压不超过温度和电压额定值, 在需要堆叠超级电容, 或者输入电压无法获得有效调节的应用中, 这些参数符合工作规格要求 (参见图1)。

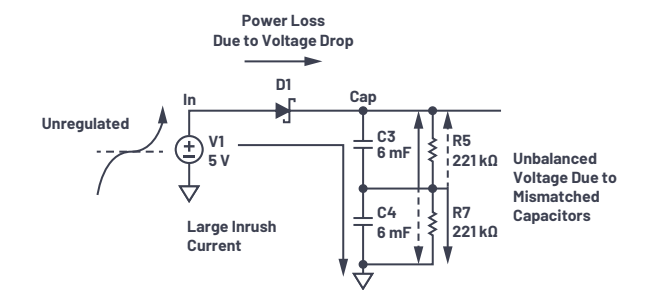


图1. 过度简单的设计导致超级电容充电方案存在风险的示例。

使用分立式组件很难构建出可靠又高效的解决方案。相比之下, 集成式超级电容充电器/备用控制器解决方案易于使用, 且一般提供以下大部分或全部功能:

- ▶ 无论输入电压如何变化, 都能稳定调节电池电压
- ▶ 各个堆叠电池可实现电压平衡, 确保无论电池之间是否失配, 都在所有运行条件下提供匹配的电压
- ▶ 电池电压保持低传导损耗和低压差, 确保系统能从给定的超级电容获取最大电量
- ▶ 浪涌限流, 支持带电插入电路板
- ▶ 与主机控制器通信

选择合适的集成式解决方案

ADI公司提供一系列集成式解决方案, 均采用所有必需的电路, 通过单个IC提供备用系统的所有基本功能。表2总结了一些ADI公司超级电容充电器的功能。

表2. 集成式超级电容充电器解决方案的功能概览

	LTC3110	LTC4041	LTC3350	LTC3351	LTC3355
V _{IN} (V)	1.8至5.25	2.9至5.5 (60 V OVP)	4.5至35	4.5至35	3至20
充电器 (V _{IN} → V _{CAP})	2 A降压-升压	2.5 A降压	10+ A降压控制器	10+ A降压控制器	1 A降压
电池数量	2	1至2	1至4*	1至4*	1
电池平衡	是	是	是	是	—
V _{CAP} (V)	0.1至5.5	0.8至5.4	1.2至20	1.2至20	0.5至5
DC-DC (V _{CAP} → V _{OUT})	2 A降压-升压	2.5 A升压	10+ A升压控制器	10+ A升压控制器	5 A升压
V _{OUT} 范围 (V)	1.8至5.25	2.7至5.5	4.5至35	4.5至35	2.7至5
PowerPath	内部FET	外部 FET	外部 FET	外部 FET	单独升压
涌入电流限制	—	—	—	是	—
系统监控	—	PWR供电轨、PG	V、I、cap、ESR	V、I、cap、ESR	V _{IN} 、V _{OUT} 、V _{CAP}
封装	24引 脚TSSOP, 24引 脚QFN	4 mm × 5 mm, 24引 脚QFN	5 mm × 7 mm, 38引 脚QFN	5 mm × 7 mm, 38引 脚QFN	4 mm × 4 mm, 20引 脚QFN

*可以配置用于四个以上电容

对于采用3.3 V或5 V供电轨的应用, 可以考虑:

- ▶ [LTC3110](#): 2 A双向降压-升压型DC-DC稳压器和充电器/平衡器
- ▶ [LTC4041](#): 2.5 A超级电容备份电源管理器

对于采用12 V或24 V供电轨的应用, 或者如果需要高于10 W的备用电源, 可以考虑:

- ▶ [LTC3350](#): 大电流超级电容后备控制器和系统监视器
- ▶ [LTC3351](#): 可热插拔的超级电容充电器、后备控制器和系统监视器

如果您的系统需要使用主降压稳压器来调节3.3 V或5 V供电轨, 使用内置升压转换器来备份, 使用单个超级电容或其他能源进行临时备份或断电应急操作, 您应该考虑:

- ▶ [LTC3355](#): 20 V、1 A降压型DC-DC系统, 带集成式超级电容充电器和后备稳压器

ADI公司还提供许多其他恒流/恒压 (CC/CV) 解决方案, 可用于为单个超级电容、电解电容、锂离子电池或NiMH电池充电。有关[超级电容解决方案](#)的更多信息, 请访问[analog.com/cn](#)。

有关其他解决方案的更多信息, 请联系当地FAE或[地区支持团队](#)。

计算保持或备份时间

在设计超级电容储能解决方案时, 多大才足够大? 为了限定讨论分析的范围, 我们将重点探讨高端消费电子产品、便携式工业设备、电能计量和军事应用中使用的经典保持/备份应用。

这项设计任务就相当于一位徒步旅行者确定进行一天徒步旅行需要带多少水。带少量水上山一开始肯定很轻松,但他可能过早地将水喝完,尤其是在艰难的徒步行程中。而携带一大瓶水的话,徒步旅行者需要背负额外的重量,但可以在整个旅程中可以保持充足饮水。此外,徒步旅行者还需要考虑天气状况:天热时多带水,天冷时少带水。

选择超级电容与此非常类似,保持时间和负载与环境温度一样,都非常重要。此外,还必须考虑标称电容的使用寿命退化,以及超级电容本身的ESR。一般而言,超级电容的寿命终止(EOL)参数定义为:

- ▶ 额定(初始)电容降低到标称电容的70%。
- ▶ ESR达到了额定初始值的两倍。

这两个参数在以下计算中非常重要。

要确定电源组件的大小,需要先了解保持/备份负载规格。例如,在电源故障的情况下,系统可能会禁用非关键负载,以便将电能传输给关键电路,例如那些将数据从易失性存储器保存到非易失性存储器的电路。

电源故障有多种形式,但备份/保持电源通常必须支持系统在持续故障时平稳关闭,或在出现短暂的电源故障时继续运行。

这两种情况下,都必须根据备份/保持期间需要支持的负载总量,以及必须支持这些负载的时间,来确定组件大小。

保持或备份系统所需的能量:

$$Energy_{Required} = \frac{1}{Efficiency} \times Power \times Time \quad (1)$$

电容中储存的电能:

$$Energy_{Stored} = \frac{1}{2} C V_{Capacitor}^2 \quad (2)$$

根据设计常识和经验,要求电容中存储的电能必须大于保持或备份所需的电能:

$$Energy_{Stored} > Energy_{Required} \quad (3)$$

这可以粗略估算出电容的大小,但不足以确定真正可靠的系统所需的大小。必须确定关键细节,比如造成电能损失的各种原因,这些最终可能导致需要更大的电容。电能损失分为两类:因DC-DC转换器效率导致的损失,以及电容本身导致的损失。

如果在保持或备份期间,由超级电容为负载供电,还必须知道DC-DC转换器的效率。效率取决于占空比(线路和负载)条件,可以从控制器数据手册获取。表2中器件的峰值效率为85%到95%,在保持或备份期间随负载电流和占空比不同而变化。

超级电容电能损失量相当于我们无法从超级电容中提取的电能。这种损耗由DC-DC转换器的最小输入工作电压决定,取决于DC-DC转换器的拓扑,称为压差。这是在比较集成式解决方案时需要考虑的一个重要参数。

采用前面的电容电能计算方法,减去低于 $V_{Dropout}$ 时无法获取的电能,可以得到:

$$Energy_{Usable} = \frac{1}{2} C (V_{Capacitor}^2 - V_{Dropout}^2) \quad (4)$$

那么, $V_{Capacitor}$ 呢?很显然,将 $V_{Capacitor}$ 设置为接近其最大额定值会增加存储的电能,但这种策略存在严重的缺陷。通常,超级电容的绝对最大额定电压为2.7V,但典型值为2.5V或低于2.5V。这是考虑到应用的使用寿命,以及额定的工作环境温度(参见图2)。在较高的环境温度下使用较高的 $V_{Capacitor}$,会降低超级电容的使用寿命。对于需要很长的使用寿命或在相对较高的环境温度下运行的稳健应用,建议使用较低的 $V_{Capacitor}$ 。各超级电容供应商通常根据嵌位电压和温度来提供估计使用寿命的特性曲线。

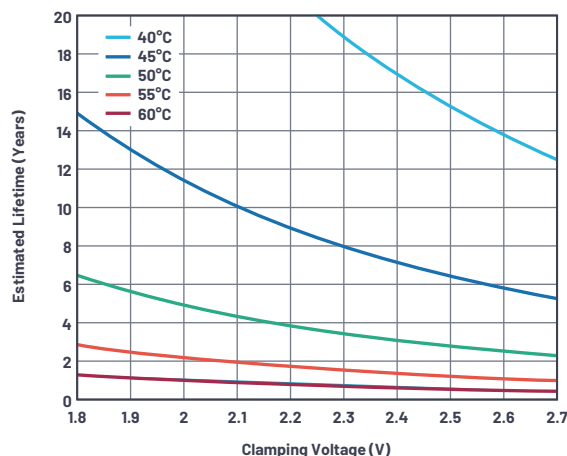


图2. 使用寿命与嵌位电压的关系图(以温度作为关键参数)。

最大功率传输定理

必须考虑的第三个影响因素不是特别明显:最大功率传输定理。为了从具有等效串联电阻的超级电容源获得最大外部功率(参见图3),负载电阻必须等于源电阻。本文交替使用耗尽、备份或负载几种表述,在这里它们都表示相同的意思。

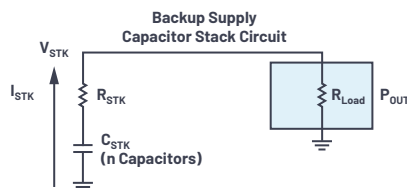


图3. 从具有串联电阻的电容堆栈供电。

如果我们将图3中的示意图作为戴维南等效电路,可以使用以下公式,轻松计算出负载的功耗:

$$P_{OUT} = V_{STK}^2 \frac{R_{Load}}{(R_{STK} + R_{Load})^2} \quad (5)$$

$$P_{OUT} = (I_{STK} R_{STK})^2 \frac{R_{Load}}{(R_{STK} + R_{Load})^2} \quad (6)$$

为了计算最大的功率传输,我们可以对前一个公式求导,求出它为零时的条件。 $R_{STK} = R_{LOAD}$ 时就是这种情况。

让 $R_{STK} = R_{LOAD}$, 可以得出:

$$P_{OUT(MAX)} = \frac{V_{STK}^2}{4R_{STK}} \quad (7)$$

这也可以直观地理解。也就是说, 如果负载电阻大于源电阻, 由于总电路电阻增大, 负载功率会降低。同样, 如果负载电阻低于源电阻, 则由于总电阻降低, 大部分功耗在电容源内; 类似的, 负载中消耗的功率也降低。因此, 对于给定的电容电压和给定的堆栈电阻 (超级电容的ESR), 当源阻抗和负载阻抗匹配时, 可传输功率最大。

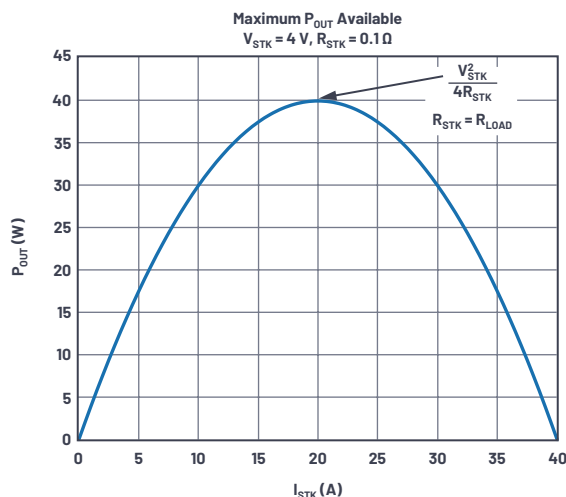


图4. 可用功率与堆栈电流的关系曲线。

关于设计中的可用电能有一些提示说明。由于堆叠式超级电容的ESR固定不变, 所以在备份操作期间唯一变化的值就是堆栈电压, 当然也包括堆栈电流。

为了满足备份负载的要求, 随着堆栈电压降低, 支持负载所需的电流增加。遗憾的是, 电流增加到超过定义的最佳水平时, 会增加超级电容的ESR损失, 从而导致可用备份功率降低。如果这种情况发生在DC-DC转换器达到其最低输入电压之前, 则会转化为额外的可用电能损失。

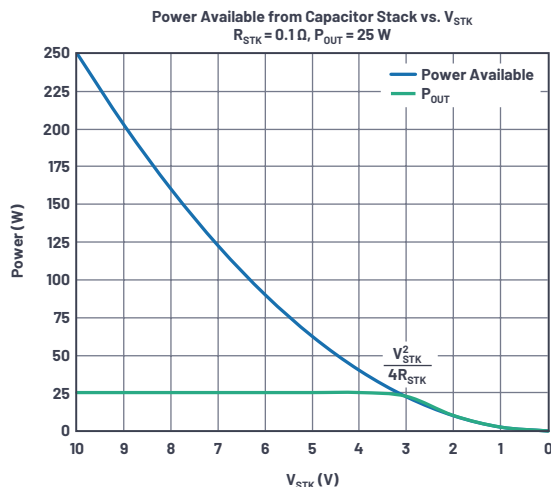


图5. 此图显示某些输出功率所需最小 V_{IN} 的推导过程。

图5显示可用功率与 V_{STK} 的函数关系图, 假设最优电阻与负载匹配, 备用功率为25 W。此图也可以视为无单位时基; 当超级电容满足所需的25 W备份功率时, 超级电容向负载放电, 堆栈电压随之降低。在3 V时, 存在一个拐点, 此时负载电流高于最优水平, 导致负载的可用备用功率降低。这是系统的最大输出功率点, 就在这个点, 超级电容的ESR损失增加。在这个示例中, 3 V明显高于DC-DC转换器的压差, 所以不可用电能完全由超级电容引起, 导致调节器未得到充分利用。理想情况下, 超级电容达到压差, 使得系统供电能力达到最高。

使用之前的 P_{Backup} 方程, 我们可以求解 $V_{STK(MIN)}$ 同样, 我们也可以考虑升压转换器的效率, 并将其加到这个公式中:

$$V_{STK(MIN)} = \sqrt{4R_{STK} P_{Backup}} \quad (8)$$

$$\text{升压运算: } V_{STK(MIN)} = \sqrt{\frac{4R_{STK} P_{Backup}}{\eta}} \quad (9)$$

使用这个下限值 $V_{STK(MIN)}$, 我们可以从最大和最小电池电压中得出电容利用率 α_B :

$$\alpha_B = \frac{V_{STK(MAX)}^2 - V_{STK(MIN)}^2}{V_{STK(MAX)}^2} \quad (10)$$

在确定备份时间时, 不仅超级电容的电容值至关重要, 电容的ESR也同样重要。超级电容的ESR决定了有多少堆栈电压可用于备份负载, 也就是利用率。

由于从输入电压、输出电流和占空比方面来看, 备份过程是一个动态过程, 所以计算所需堆栈电容的完整公式不会像前面的版本那么简单。可以看出, 最终公式为:

$$C_{SC} \geq \frac{2P_{Backup} t_{Backup}}{n \eta V_{STK(MAX)}^2 \left[\frac{\alpha_B + \sqrt{\alpha_B}}{2} - \frac{1 - \alpha_B}{2} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\alpha_B}}{\sqrt{1 - \alpha_B}} \right) \right]} \quad (11)$$

其中 η = DC-DC转换器的效率。

超级电容备份系统设计方法

根据前面介绍的概念和计算说明, 超级电容备份系统设计方法总结如下:

- ▶ 确定 P_{Backup} 和 t_{Backup} 的备份要求。
- ▶ 针对所需的电容使用寿命确定最大电池电压 $V_{STK(MAX)}$ 。
- ▶ 选择堆叠电容数量(n)。
- ▶ 为超级电容选择所需的利用率 α_B (例如, 80%到90%)。
- ▶ 求解得出电容 C_{SC} :

$$C_{SC} \geq \frac{2P_{Backup} t_{Backup}}{n \eta V_{STK(MAX)}^2 \left[\frac{\alpha_B + \sqrt{\alpha_B}}{2} - \frac{1 - \alpha_B}{2} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\alpha_B}}{\sqrt{1 - \alpha_B}} \right) \right]} \quad (12)$$

- ▶ 找到具有足够 C_{SC} 的超级电容, 并检验是否满足最低 R_{SC} 公式:

$$R_{SC} \leq \frac{\eta (1 - \alpha_B) n V_{STK(MAX)}}{4P_{Backup}} \quad (13)$$

LTC3350 Backup Time Calculator				
Entered Values >>				

图6. 采用25 F电容的36 W、4秒保持时间系统和LTC3350/LTC3351的计算结果。

LTC3350 Backup Time Calculator				
Entered Values	>>>>>>>>>>			
Calculated Values	>>>>>>>>>>			
Enter End of Life (EOL) ESR and Capacitance change to determine backup time at EOL.				
Enter Initial Values below.				
EOL Parameter Definitions				
% of Initial Capacitance at EOL	70	Typ=70		
% of Initial ESR at EOL	200	Typ=200		
VIN Nominal (35V Max)	12			
Parameter	Initial Value	EOL Backup Values		
		ESR	Cap	CAP & ESR
VOUT Backup Voltage ($\geq 4V$) [V]	12			
POUT Backup Power [W]	36			
Boost Efficiency [%]	90			
VCAP (Stack Voltage) [V]	9.60			
# of Caps in Series	4			
CAPx Capacitance [F]	45,000		31.5	31.5
CAPx ESR [Ohms]	0.03	0.06		0.06
Boost Peak Current (58mV/RSNSC) [A]	15			
Stack Capacitance [F]	11.250	11.250	7.875	7.875
Stack ESR [Ohms]	0.12	0.24	0.12	0.24
Min VCAP during Boost Backup [V]	4.38	6.20	4.38	6.20
Alternate Min Cell Voltage (0 if not used)	0			
Total Backup Time [Sec]	8.97760	6.01519	6.28432	4.21063
NOTE: Small changes in ESR can make large difference on high power outputs. Actual measured results will vary.				DONE

图7. 采用45 F电容系统和LTC3350/ LTC3351的计算结果.

如果没有合适的电容, 可以选择更高的电容、更高的电池电压、更多的堆叠电容或更低的利用率进行迭代。

考虑超级电容的寿命终止因素

对于必须达到一定使用寿命的系统, 使用前面所述方法并考虑EOL值时必须进行相应更改, 一般采用70% C_{NOM} 、200% ESR_{NOM} 。这使计算变得复杂, 但是大部分ADI超级电容管理器都可以使用产品页面上现有的电子表格工具进行计算。

我们以LTC3350为例来使用简化方法:

- ▶ 所需的备用功率为36 W, 持续时间为4秒。
- ▶ 为实现更长的使用寿命/支持更高的环境温度, 将 $V_{CELL(MAX)}$ 设置为2.4 V。
- ▶ 四个电容以串联方式堆叠在一起。
- ▶ DC-DC效率(η)为90%。
- ▶ 使用最初推测的25 F电容, 通过电子表格工具可得出结果, 如图6所示。

基于最初推测的25 F电容, 我们使用标称值得出了所需的4秒备份时间 (具有25%的额外裕量)。但是, 如果我们考虑ESR和电容的EOL值, 我们的备份时间几乎缩短一半。若要使用电容的EOL值获得4秒备份时间, 我们必须至少修改其中一个输入参数。由于它们大多是固定值, 因此电容是最容易增加的参数。

- ▶ 将电容增加至45 F, 通过电子表格工具得出结果, 如图7所示。
- 使用45 F时, 由于标称值提供了长达9秒的备份时间, 增加的幅度似乎很大。但是, 通过添加 CAP_{EOL} 和 ESR_{EOL} 参数, 并得出6.2 V最低堆栈电压之后, 考虑EOL时的备份时间骤降一半。但是, 这仍然满足我们需要4秒备份时间的要求, 并且具有5%的额外裕量。

额外的超级电容管理器功能

LTC3350和LTC3351通过集成ADC提供额外的遥测功能。这些部件可以测量超级电容堆栈的系统电压、电流、电容和ESR。进行电容和ESR测量时, 对在线系统的影响也极小。器件配置和测量通过 I^2C /SMBus进行通信。因此系统处理器能够在应用的生命周期内监控重要参数, 确保可用的备份电源满足系统要求。

LTC3350和LTC3351能够实时测量超级电容堆栈的电容和ESR, 使用新电容时可降低钳位电压, 从而轻松满足备份要求。接收遥测数据的处理器可以进行编程, 以实施上述计算。因此系统可实时计算满足备份时间所需的最小箝位电压, 并考虑实时电容和ESR。该算法将进一步提高超级电容备份系统的使用寿命, 如图2所示, 在高温条件下, 即使钳位电压稍微降低, 也会显著延长超级电容的寿命。

最后, LTC3351具有热插拔控制器, 用于提供保护功能。热插拔控制器使用背对背N通道MOSFET提供折返限流功能, 可减少高可用性应用中的浪涌电流和短路保护。

结论

利用标称值下的电能传输基础知识, 可以将计算满足备用规格所需的电容值转换为简单的计算所需功率, 以及存储功率问题。遗憾的是, 当您考虑最大功率传输、电容器的EOL电容和ESR的影响时, 这种简单的方法无法满足要求。这些因素会极大地影响系统在整个寿命周期内的可用电能。利用ADI的集成超级电容解决方案和大量可用的备份时间计算工具, 模拟工程师可以胸有成竹地设计和构建可靠的超级电容器备份/保持解决方案, 不仅能够在应用的使用寿命内满足设计要求, 而且对成本的影响极小。



作者简介

Markus Holtkamp于1993年获得德国波鸿大学颁发的学位。他于2010年10月加盟凌力尔特 (现为ADI公司的一部分), 担任现场应用工程师 (FAE), 为中欧客户提供技术支持。Markus曾在一家德国设计公司担任了14年的IC设计师 (高速和混合信号ASIC), 也曾任Arrow Electronics工作三年半, 担任模拟现场应用工程师。他已婚, 有两个孩子, 酷爱体育运动。联系方式: markus.holtkamp@analog.com。



作者简介

Gabino Alonso目前是Power by Linear™部门的战略营销总监。加入ADI公司之前, Gabino在凌力尔特、德州仪器、加州理工州立大学担任过市场营销、工程、运营和讲师等多个职位。他拥有加州大学圣巴巴拉分校电子和计算机工程硕士学位。联系方式: gabin.alonso@analog.com。

