应用札记
ANC202306001

电池测量和均衡解决方案

作者：谭磊、林风、田怀山

圣邦微电子（北京）股份有限公司

2023 年 6 月 15 日

商标

SGMICRO 是圣邦微电子（北京）股份有限公司的商标。本文档中的所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2023 圣邦微电子（北京）股份有限公司 版权所有。

未经 SGMICRO 事先书面许可，任何单位或个人不得摘抄、复制或改编本文档的部分或全部内容。

欲了解更多关于 SGMICRO 的信息，请访问网站 www.sg-micro.com。

目录

1 引言 2

2 圣邦微电子提出的解决方案 3

2.1 “组串间均衡” 4

2.2 组串内测量和均衡 4

2.3 谐振电荷转移原理 6

2.4 产品结构形式选择 7

1 引言

库仑效率（Coulombic Efficiency，CE）是指一个完整的充放电周期内，电池总的放电电荷与总的充电电荷的比值。当铅酸电池充电到较高电压时，库仑效率会急剧下降，继续充电不会进一步提升电池电压或增加可放电电量，但会将电能转化成热量耗散掉，而不会对其蓄电机理造成严重损害。就铅酸电池而言，如果不考虑能量损失，就无需考虑均衡和精细到电池单元的监测；而对于旨在提高能源利用率的储能应用，库仑效率随着电压的升高而急剧下降是完全不能接受的，这类应用需要确保电池在高库仑效率的电压范围内工作。对于锂蓄电池，在电压达到库仑效率转折点后，蓄电机理就会被破坏、甚至会发生热崩溃。为防止此类现象发生，锂蓄电池需要测量各电池单元的电压，均衡各电池单元的电量，确保电池组中的各电池单元状态一致。

电池组串中单个电池单元所能承受的充放电电压的上下限，决定了整个组串充放电电压的上下限值。组串蓄电能力受限于组串电池单元中的“短板”单元，无法利用“长板”单元的能力。通常锂蓄电池早期充放电循环的库仑效率接近 1（~99.9%），随着循环次数的增加，很快会降到 99%以下。库仑效率反映了充放电过程中的电荷损失以及由此导致的电池容量降低，“短板”和“长板”的充放电区间因库仑损失加剧分化。图 1 是对库仑效率影响的夸张示意。

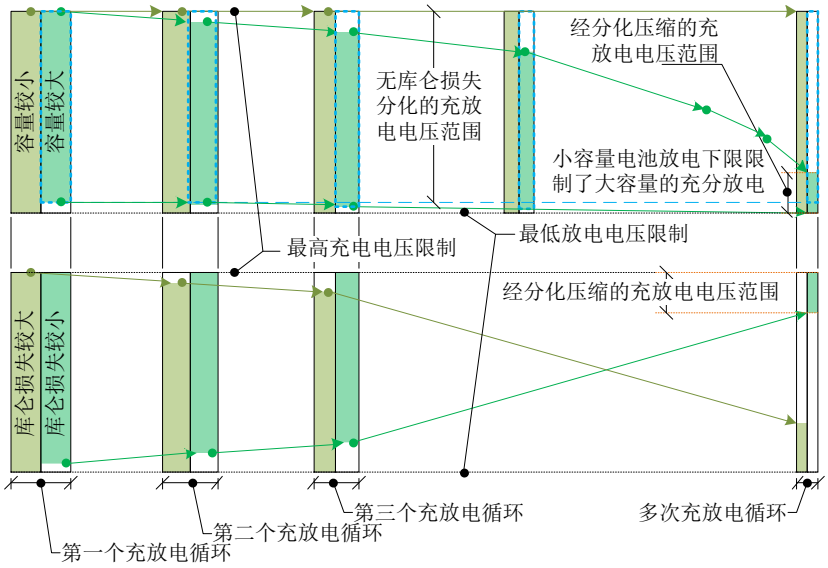


图 1 充放电循环加剧电池充放电区间分化

图中上半部分表示：若一个容量较大的电池串联一个容量较小的电池，其充放电量将受容量较小的电池制约，受到相同库仑效率的影响。容量较大的电池在每次放电后再充电不能完全补充其电荷损失，导致其充放电电压范围累进减小。此时电池组串充放电量仍由“短板”决定，组串电压范围显著缩小，导致蓄能能力下降。图中下半部分表示：串联的两个电池单元容量一致，但库仑效率不同时，库仑效率高（电荷损失小）的单元总是先充满，库仑效率低的单元总是先放完，导致它们

的充放电电压范围分别朝两端分化。这种分化导致充放电电荷量和蓄能能力同时急剧下降。无论是容量差异还是库仑效率的差异，其分化都是一个累积的过程，其影响主要表现为前期经过几十次充放电后，电池组串的蓄能能力快速下降，从而影响循环寿命的预估。

为保障使用安全，有必要对组串内每个电池单元进行电压监测。是否实施电池均衡，采用什么方案，则是用户和设备供应商权衡实施成本、可靠性风险成本和综合收益的结果。分化影响出现在应用的中后期，对用户和设备供应商的影响不会即时显见，而配置均衡电路增加的成本和产生的额外功耗则是立等可见的。这就决定了均衡电路需要与测量电路结合起来，以最低代价实现才可能被接受。

除了实施成本和包括储能效率的收益影响，可靠性风险成本的增加也会严重影响方案决策。图 2 用来解释与组串内各电池单元连接的电路在电池组串出现异常开路时产生高反向电压的机理。当图中的电池组串异常开路时，V_a 和 V_b 的电压由负载电阻 R_{load} 和 V_a-V_b 之间的等效电阻 R_{eff} 的分压关系决定。在极端情况下会出现 V_a-V_b 之间的反向电压仅比组串电压低一个电池单元的电压，或者 V_a 点与接地的机架之间的反向电压等于组串电压。电池单元电压监测电路可以通过串联电阻限流和箝位器件进行保护，但需要低阻通路以保证效率的均衡电路则无法通过限流电阻进行保护。均衡电路需要更大的硅片面积开销，以确保其性能、耐压等级以及与之相关的可靠性。

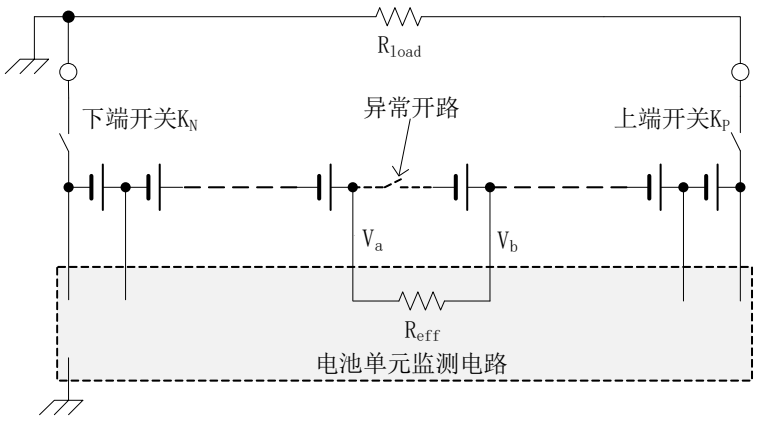


图 2 异常连接状态导致反向电压应力

2 圣邦微电子提出的解决方案

为满足结构和电气安全要求，以及匹配不同集成电路工艺的耐压等级，高压电池组拆分为最高电压（$60V_{DC}$）以下的多个子组串，各子组串配备独立的测量和均衡电路，以简化维修并扩展半导体工艺选项。$60V_{DC}$ 是公认的 $36V_{AC}$ 对应的 DC 电压的安全上限，也是常见的集成电路工艺所能覆盖的耐压等级。分解成子组串也有利于布线设计和 EMC 设计。

2.1 “组串间均衡”

当子组串内配备独立的测量和均衡电路时，子组串间还需要提供跨子组串转移电荷的能力。图3是以子组串为单元的均衡电路，该电路由圣邦微电子提出（专利已登记，目前在审核中），对照方案可见参考资料[1]的综述。

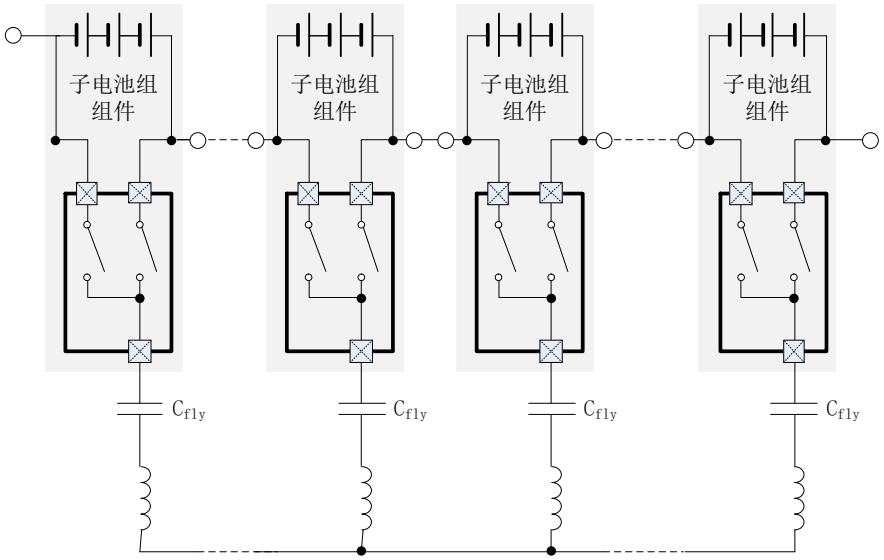


图 3 以子组串为单元的测量和均衡电路说明

与综述介绍的方案相比，圣邦微电子提出的“组串间均衡”是通过组串内电路自行实现的，不需要系统层面的协调控制，组串内电路只需承受组串指定的电压应力和电流应力。这个电路的飞电容接法是关键差异结构，允许单个飞电容异常短路。

启用“组串间均衡”功能时，仅需要向某个组串内电路输入启动信号，其它组串内电路就会检测到飞电容耦合的信号，并启动相应的动作。如果检测到正电压变化，则连接其右侧开关；反之，连接其左侧开关。结果是每个组串内的电路将其组串电压斩波后通过电路下方的 L-C 连接到一起。如果一个组串自身电压偏高，就向电压偏低的组串输出电荷；反之，则从其它较高电压的组串获取电荷。

与对照方案相比，“组串间均衡”方案中任意两个组串间的电荷转移流经相同数量的 L-C，与组串在整个电池组中的位置无关。通路中的 L-C 组成谐振结构，可以增强低压差下的电荷转移能力。组串内电池单元间的均衡也可通过相同的 L-C 谐振结构增强电荷转移能力（这部分后面会做进一步解释）。从电池计量和充放电保护角度来看，该方案不需要测量子组串的电压，其电压可由组串内电池单元电压测量结果合成，或通过系统的其他连接电路或保护电路完成。

2.2 组串内测量和均衡

图 4 是组串内的测量和均衡电路。电路的开关驱动、保护设计和谐振工作方式由圣邦微电子提

出（专利已登记，目前在审核中），对照方案可见参考资料[1]的综述、资料[2]和[3]两份专利说明，以及资料[4]TI 的产品规格书。

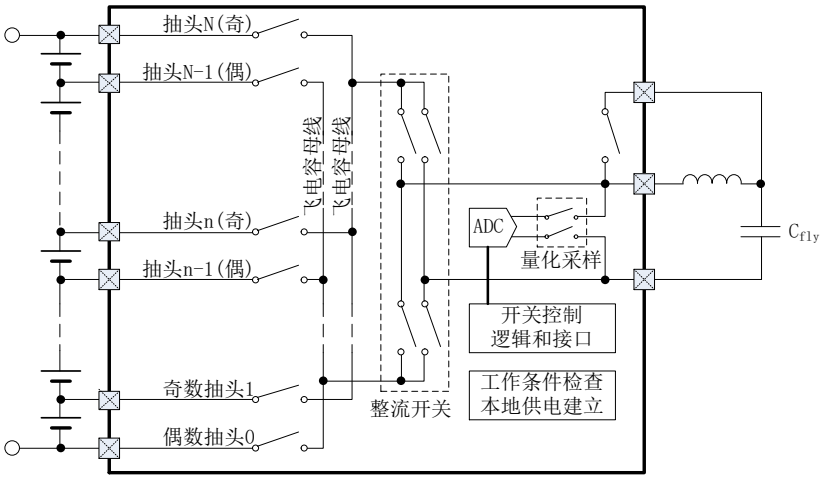


图 4 子电池组内测量和均衡电路说明

图中抽头开关连接电池单元和飞电容母线，每次只开通相邻的两个抽头开关。图中左右两条飞电容母线间的压差会出现正负倒替。整流开关确保将母线上倒替的压差以正确的极性连接到飞电容上。这种倒替接入母线-整流的结构减少了抽头开关的数量，还可以兼顾谐振控制对开关数量的要求。谐振过程会延长电池单元电压采样的建立过程，图中右上侧的开关可以在电压测量时旁路谐振电感，加快电压采样的建立时间。图中所有开关均采用电容驱动，除谐振开关控制电路外，无需直流偏置电路。不驱动时，电路自然进入开关截止状态，便于保护设计，并实现抗负电压应力设计。

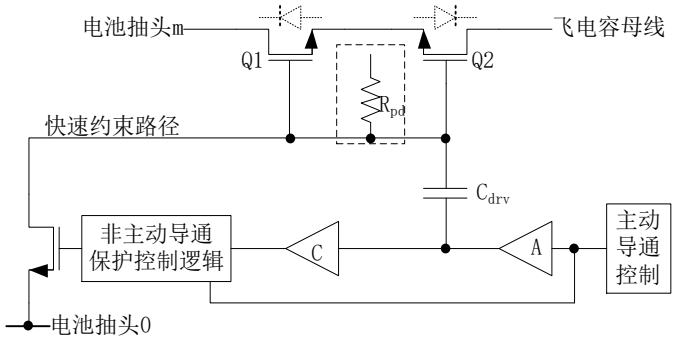


图 5 抽头开关设计说明

图 5 为抽头开关驱动及保护的示意电路。正常状态下的电池抽头电压波动不大，飞电容母线电压被箝位在当前或上次采样的电压上，可能高于或低于电池抽头电压。电池抽头与飞电容母线的连接被图中对应极性的 MOSFET 开关阻断，C_{drv} 上的直流电压跟随较低电压侧变化。驱动脉冲通过 C_{drv} 耦合开通开关。R_{pd}-C_{drv} 网络的稳定时间与开关的阈值一起决定了导通状态的保持时间。抽头和飞电容母线电压波动会通过 C_{drv} 传递到保护电路，如果波动超出预设范围，则触发 C_{drv} 放电，强制两者断开；如果电池抽头出现负电压，则借助 R_{pd} 限流提供箝位保护。

无直流偏置的电容驱动开关、外部采样电容和谐振电荷转移构成了该方案与其他方案的关键差异。使用外接较大电容不仅兼顾了均衡的需要，同时因其容量较大，开关过程中寄生电容耦合产生的干扰影响较小，有利于高精度的电压采样。

2.3 谐振电荷转移原理

参考图 6，当电压保持在 V_f的飞电容支路分别与左侧偏高电压为 V0 的电池单元，以及与右侧偏低电压为 V1 的电池单元连接时，波形示意见图(b)。L-C 谐振的电荷转移过程出现接触浪涌。理想条件下每次接触飞电容的升压幅度是接触前压差的两倍。如果在半谐振周期时关断开关，可将谐振引起的升压保持在飞电容上。在电荷转移过程中，飞电容在两个有压差的电池之间交替连接，该过程将不断扩大飞电容的升压幅度，最终的升压幅度由等效通路上的 R_{loss} 决定（即谐振槽路 Q 值决定）。

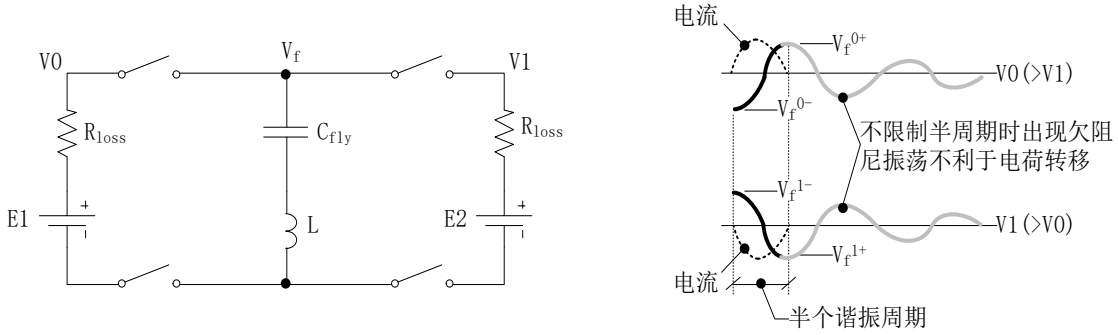


图 6 谐振电荷转移的原理说明

谐振开关的开通由设定的工作频率或外部触发条件决定，关断时刻则由相应的开关本身决定。对于图 3 所示电路，谐振不止发生在两个子电池组之间，相应的开关在导通时需要检测电流极性，然后根据电流极性检测电流降到零时关断开关。接触浪涌电流从升高到下降回零的过程对应半个谐振周期。检测零电流触发开关关断的方式不受其他开关谐振过程的影响。图 7 是部分时间谐振的波形示意。电容上电压变化的幅度即 LRC 谐振所能达到的幅度，增幅能力由其 Q 值决定($=\sqrt{L/C}/R$)；压差为 dV，开关频率为 f_{sw} 时转移电流为（$f_{sw}\cdot dV\cdot\sqrt{L\cdot C}/R$）。部分时间谐振在飞电容断开期间切换电池连接，恰恰有利于减少切换期间带来的损失。

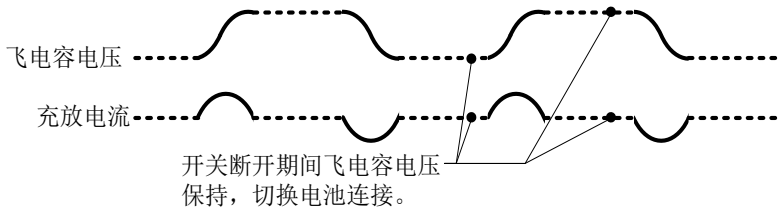


图 7 部分时间谐振波形示意

2.4 产品结构形式选择

图 3 电路抽头开关数量比图 4 电路多，电感电容也多。考虑到图 4 电路还需要整流开关，在节数较低时采用图 3 电路更为合理。均衡的电池组串充放电计量等同于单个电池，任何一个抽头的电压都能反映整个电池组串的特征，如续航时间、有效容量和单元电压；电池的健康程度与每个电池单元相关（参考资料[5]和[6]）。在应用过程中，需要利用符合特征的阶跃响应来提取与电池化学反应动力相关的特征参数，即利用获取的高分辨率电压变化过程进行反卷积解析，提取电池单元内部化学反应过程的响应参数。图 3 电路是电荷泵的一种变形，其电荷转移能力足以在任何抽头节点之间传递以及直接做输入或输出。

具体选择哪种形式取决于应用需要和实施收益。只测量而不均衡，并不改善组串的状态，仅可算是一种风险防护投入；就正常系统而言，用户和厂家没有收益。旁路均衡在极端情况下可能因一节电池欠压而对组串中所有其余电池旁路放电，投入大、效能低，且其低效能并不因为把这个过程隐藏在充电后期“不定期均充”而有任何改善。主动均衡可让系统工作在高容量利用率、库仑损失稍差的高电压，裨益用户和厂家双方。

参考资料

[1] Anushree Ramanath. Active and Passive Battery Pack Balancing Methods[EB/OL]. (2020-11-24). https://eepower.com/technical-articles/active-and-passive-battery-pack-balancing-methods.

[2] 冉峰，徐浩，季渊，秦嘉琦. 一种共用开关阵列的电池采样均衡电路：201610104589.9[P]. 2016-07-20.

[3] 王贤江，胡振营. 一种串联电池组均衡电路：201510386342.6[P]. 2015-09-23.

[4] Taxes Instrument Incorporated. bq77pl900 产品规格书[EB/OL]. (2009-01). https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/bq77pl900.pdf.

[5] 谭磊. 锂电池电量的计量方法和计量装置: 201310027548.0[P]. 2013-04-17.

[6] Yevgen Barsukov. Challenges and Solutions in Battery Fuel Gauging[EB/OL]. https://www.ti.com/lit/ml/slyp086/slyp086.pdf.

修订记录

注意:历史版本的页码可能与当前版本的页码不同。

日期	版本	描述
2023-06-15	REV.A	首次发布

重要声明

本文档中如涉及本公司具体产品型号，SGMICRO 保留其更改电路设计、产品规格和产品描述的权利，恕不另行通知。本文档内容仅供参考。本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何承诺。对于本文档中可能出现的错误，以及因本文档提供的信息和使用本文档而造成的任何附带或间接损失，本公司不作任何明示或暗示的陈述和保证。

此文档未授予任何知识产权许可。除了 SGMICRO 在其产品的销售条款和条件中声明的责任外，本公司概不承担任何其他责任。

www.sg-micro.com

联系方式

圣邦微电子(北京)股份有限公司

地址：北京市海淀区西三环北路 87 号国际财经中心 D 座 11 层

邮编：100089

电话：010-88825716/17

深圳办事处

地址：深圳市南山区科技园高新南六道 6 号迈科龙大厦 15 层

邮编：518063

电话：0755-26715323

上海办事处

地址：上海市徐汇区漕溪北路 88 号圣爱大厦 1706 室

邮编：200030

电话：021-64396434