Application Note

基于 BQ76907 的超级电容备电系统均衡策略设计

Frank Qin

摘要

BQ76907-Q1 是一款 2S – 7S 低功耗电池监控与保护器件，数据手册中已将超级电容列为支持对象之一。器件支持由主机发起和控制的被动均衡，可采用集成旁路路径或外部均衡 FET 实现。对于需要更高均衡电流的系统，明确建议使用外部 FET 均衡电路。

本文面向一种 5 串超级电容 backup power 备电系统：系统由车载 12 V 经 Buck-Boost 提供稳定 12 V 充电电源，并采用外部电阻加 MOSFET 的被动均衡方案。本文重点讨论如何更好地实现全部通道在被动均衡架构下的最优方案。

内容

1 引言 2
2 BQ76907 的被动均衡机制 3
2.1 均衡电流路径 3
2.2 均衡电流 4
2.3 均衡时间估算 4
3 超级电容系统的特殊性 5
3.1 ESR 与电压恢复效应 5
3.2 对均衡策略的影响 5
4 均衡方案设计 6
5 参考算法的实现以及示例 7
5.1 算法流程和伪代码 7
5.2 设计示例 7
6 总结 9
7 参考文档 9

插图清单

图 2-1. 5 串超级电容均衡电路示意图 3

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 引言

在车载电子系统中，backup power 常用于主电源掉电、冷启动扰动、通信保持或故障安全过渡期间的短时供能。与锂电池相比，超级电容具有高功率密度、长循环寿命和较好的低温功率特性，因此非常适合用于短时能量缓冲场景。随着相关安全要求的落地，汽车系统中对于门把手在发生车辆事故和断电的情况下使用备用电源进行释放和解锁成为硬性要求。BQ76907-Q1 作为超级电容控制和均衡芯片可以很好的提供超级电容备用电源的监控和保护。

器件提供高精度 cell 电压测量、SRP/SRN 电流检测、温度采样以及主机控制的被动均衡能力，因此也可用于 5 串超级电容组的监控和均衡控制。

需要强调的是，BQ76907 本质上并不是主动均衡器件。其均衡能力是绕过某一串 cell 的电流来实现的，即通过旁路支路将该串单体放电，而不是把能量从高电压单体转移到低电压单体。这个物理边界决定了均衡算法的设计方向。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 BQ76907 的被动均衡机制

2.1 均衡电流路径

BQ76907-Q1 的数据手册指出，器件支持主机控制的被动均衡，均衡可以通过子命令启动，支持相邻或非相邻 cell 同时均衡。

下面给出 5 串超级电容在外部 FET + 电阻被动均衡方案中的简化结构图。该图表达的是均衡电流路径，而不是完整原理图。

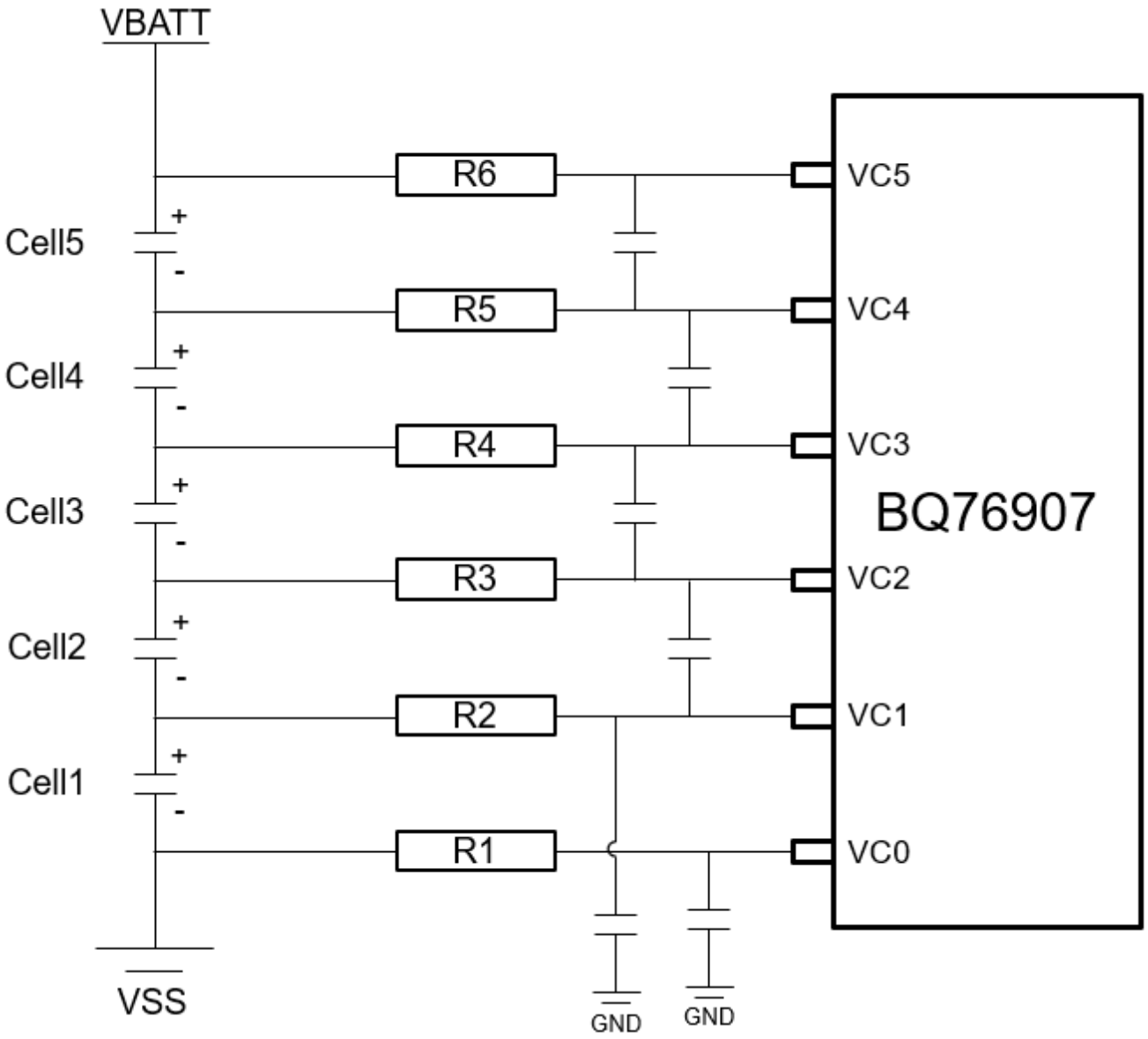

图 2-1. 5 串超级电容均衡电路示意图

当第 n 串均衡导通时，电流路径为：

$$VC_n \rightarrow Q_n \rightarrow R_n \rightarrow VC_{n-1} \quad (1)$$

这意味着：

Cell 5 的均衡支路把 Cell 5 的能量泄放到 VC4 节点

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Cell 4 的均衡支路把 Cell 4 的能量泄放到 VC3 节点

…

Cell 1 的均衡支路把 Cell 1 的能量返回到 VC0 节点

这就是典型的 top-down passive discharge 结构。这种结构地作用就是降低高电压单体所存储地能量，而不是将能量转移至低电压单体。这个特性决定了被动均衡只能实现高电压串地电压降低，而无法直接提高最低电压串的电压。因此在测试中会体现出均衡速度较慢，效率偏低的特点。

2.2 均衡电流

均衡电流近似为：

$$I_{bal,n} \approx \frac{V_{cell,n}}{R_{bal,n}} \tag{2}$$

其中：

- $V_{cell,n}$ 为单体电压
- $R_{bal,n}$ 为均衡支路电阻

对于相同均衡电阻，高电压单体具有更大的均衡电流。因此多个单体同时均衡时，高电压单体的电压变化速率明显快于低电压单体。

2.3 均衡时间估算

对超级电容有：

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt} \tag{3}$$

代入得到：

$$C_n \cdot \frac{dV_n}{dt} = -\eta\mathrm{CB} \cdot \frac{V_n}{R_{bal,n}} \tag{4}$$

整理为：

$$\frac{dV_n}{dt} = -\frac{\eta\mathrm{CB}}{R_{bal,n}C_n}V_n \tag{5}$$

解该一阶微分方程可得：

$$V_n(t) = V_{n0} \cdot e^{-t/\tau_n} \tag{6}$$

其中时间常数为：

$$\tau_n = \frac{R_{bal,n}C_n}{\eta\mathrm{CB}} \tag{7}$$

这说明：

均衡目标越快，需要更小的 R_{bal} 或更高的有效占空比 ηCB。超级电容容量与均衡时间常数成正比。

可以依据以上公式得到工程近似公式：

在小压差、短时间区间内，也可以近似认为电流不随电压显著变化，此时：

$$t_{bal} \approx \frac{C \cdot \Delta V}{I_{bal,avg}} \tag{8}$$

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

进一步代入平均均衡电流：

$$t_{bal} \approx \frac{C \cdot \Delta V \cdot R_{bal}}{\eta_{CB} \cdot V_{cell}} \quad (9)$$

该公式适合估算某一串从高于最低串 ΔV 时，大约需要多久才能收敛；选取多大均衡电阻才能达到目标均衡时间。这个公式仅在 ΔV<100mV，V_{cell}>1V 这个范围适用。

3 超级电容系统的特殊性

将 BQ76907 面向锂离子电池设计的被动均衡架构应用于超级电容系统时，需要关注两个额外的特性。超级电容不存在锂离子电池那样的电压平台区，端电压与存储能量的关系更为直接，电压差 ΔV 本身就是一个有效且直接可用的均衡判据；超级电容的漏电流离散性通常也比锂离子单体更明显，均衡需求并不局限于充电末端。除此之外，以下两个动态特性会直接影响均衡判据的取值方式，但不改变本文推荐的均衡核心策略。

3.1 ESR 与电压恢复效应

超级电容端电压颗表示为：

$$V_{CELL} = V_{OC} + I \cdot ESR \quad (10)$$

其中：

- V_{OC} 为开路电压
- I 为流经 cell 的电流
- ESR 为等效串联电阻

当系统处于充电或者放电状态时，测得的单体电压并不完全代表其真实储能状态。如果直接使用瞬时电压进行均衡判断，可能导致错误的均衡决策。当充放电电流移除后，超级电容内部电荷重新分布，端电压会缓慢恢复至新的稳定值。这一过程通常被称为电压恢复效应(Voltage Relaxation)。因此在大电流工况结束后立即进行均衡判断，可能会高估或低估实际电压差异。

3.2 对均衡策略的影响

上述两个特性意味着均衡算法应尽可能基于接近稳态的电压数据进行决策，而不是基于瞬时采样结果。

因此在设计均衡算法机制时应避免在大电流瞬态期间进行均衡判定；应适当引入静置时间（Relaxation Time）；或利用电流测量结果进行 ESR 补偿。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 均衡方案设计

在实际测试中，如果同时开启多串均衡通道，常见的现象是电压最高的 1~2 串电压下降明显，而电压较低的几串在短时间内变化很小。这一现象的原因并不是器件只开启了部分通道——实际上所有被使能的通道都在导通——而是源于 节 2.1 给出的均衡电流近似关系：均衡电流近似与单体电压成正比，电压越高的单体均衡电流越大，电压下降也越快；电压较低的单体均衡电流相应更小，在同样的观测时间窗口内变化不明显。

如果让全部单体同时持续均衡，电压最低的单体也会被继续放电，PACK 总电压下降速度加快，压差收敛效率却相对更低，还会损失更多本可保留的可用能量。这一现象的根本原因是 BQ76907-Q1 的被动均衡不能把能量从高电压单体转移到低电压单体，只能对电压偏高的单体放电；让电压最低的单体参与均衡并不会带来额外收益，反而会拖慢整体收敛效率。因此，全部通道同时均衡通常不是最优方案。

由此本文提出对于超级电容系统，均衡目标并非提高最低单体电压，而是降低最高单体电压与最低单体电压之间的差异：

$$\Delta V = V_{max} - V_{min} \tag{11}$$

因此，推荐采用选择性均衡策略。首先识别系统中电压最低的单体：

$$V_{min} = \min(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) \tag{12}$$

然后计算出各个单体对于最低单体的电压差：

$$\Delta V_i = V_i - V_{min} \tag{13}$$

仅对满足条件的单体设置带滞回的开启/关闭阈值，开启条件：

$$\Delta V_i > \Delta V_{on} \tag{14}$$

这样可以避免最低单体被继续放电。与全通道同时均衡相比，该方法能够减少系统能量损失，并且提高压差收敛效率。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 参考算法的实现以及示例

5.1 算法流程和伪代码

系统周期性执行以下步骤：

1. 关闭所有均衡通道；
2. 等待电压稳定；
3. 采集所有单体电压；
4. 计算最大电压与最小电压；
5. 判断压差是否超过均衡阈值；
6. 对目标单体开启均衡；
7. 到达均衡时间后重新测量。

参考伪代码如下：

```
while(1)
{
    Disable_All_Balance();
    Delay(RELAX_TIME_MS);
    Measure_Cell_Voltages();
    vmax = Find_Max_Cell();
    vmin = Find_Min_Cell();
    if ((vmax - vmin) > BAL_START_TH)
    {
        Enable_Balance(vmax_cell);
        Delay(BALANCE_TIME_MS);
        Disable_All_Balance();
    }
    Delay(MONITOR_PERIOD_MS);
}
```

5.2 设计示例

本节给出一个简化设计示例，用于说明被动均衡电流、超级电容容量和目标压差之间的关系。该示例仅用于一阶估算，实际系统仍需结合均衡电阻误差、MOSFET 导通阻抗、PCB 温升、ADC 采样误差以及超级电容 ESR 进行验证。

假设系统采用 5 串超级电容，每串电容参数如下：

C=100F

假设某一串超级电容电压高于最低串：

ΔV=50mV

目标是通过被动均衡将该电压差消除。超级电容需要移除的电荷量为：

$\Delta Q=C\times \Delta V$

代入参数：

ΔQ=100F×0.05V=5C

若均衡支路的平均均衡电流为：

$I_{BAL,AVG}$=20mA

则理想均衡时间为：

$$t_{BAL}=\frac{\Delta Q}{I_{BAL,AVG}}=\frac{C\times \Delta V}{I_{BAL,AVG}} \quad (15)$$

代入参数：

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$$t_{BAL} = \frac{5C}{0.02A} = 250s \quad (16)$$

即在 20 mA 平均均衡电流条件下，将 100 F 超级电容的 50 mV 压差削减掉，理论上约需要 250 s。

如果均衡电流提高至 100 mA，则：

$$t_{BAL} = \frac{5C}{0.1A} = 50s \quad (17)$$

该结果说明，对于大容量超级电容系统，均衡时间主要由电容值和平均均衡电流决定。若目标是缩短均衡时间，应优先提高允许的平均均衡电流，同时评估均衡电阻和 MOSFET 的功耗与热设计。

被动均衡支路的瞬时电流可近似表示为：

$$I_{BAL} \approx \frac{V_{CELL}}{R_{BAL}} \quad (18)$$

若考虑均衡开关并非 100%持续导通，可引入有效均衡占空比 η_{BAL}：

$$I_{BAL,AVG} \approx \eta_{BAL} \cdot \frac{V_{CELL}}{R_{BAL}} \quad (19)$$

因此，均衡时间可进一步写为：

$$t_{BAL} \approx \frac{C \times \Delta V \times R_{BAL}}{\eta_{BAL} \times V_{CELL}} \quad (20)$$

因此，在超级电容系统中，低电压区间的均衡速度会明显变慢。即使开启了均衡通道，当单体电压较低时，由于均衡电流本身较小，短时间内电压变化可能不明显。这也是测试中常观察到高电压单体变化明显，而低电压单体变化不明显的原因之一。

在实际算法中，该设计示例也说明了两个工程原则：

第一，均衡判断不应基于过短时间内的电压变化。对于 100 F 级别的超级电容，即使几十毫安均衡电流持续数秒，电压变化也可能只有毫伏级，容易被采样噪声、ESR 动态压降和电压恢复效应覆盖。

第二，均衡控制应采用阈值和滞回机制。例如，当某一串相对于最低串的压差大于 50 mV 时开启均衡，当压差降低到 20 mV 以下时关闭均衡。这样可以避免由于瞬态电压误差导致均衡通道频繁切换。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 总结

BQ76907-Q1 支持由主机控制的被动均衡，并可通过外部 FET 实现更高的均衡电流，因此可以用于 5 串超级电容 backup power 系统的监控与均衡。

BQ76907 的均衡本质是逐级向下的被动放电，不是主动能量转移。同时开启多串均衡时，所有通道都在工作，但高电压串由于均衡电流更大，表现得最明显。全部通道同时均衡通常不是最优方案，因为它会继续削低最低串。对于 5 串超级电容，推荐的最优方法是：仅对显著高于最低串的 cell 执行选择性均衡，并加入阈值与滞回，由 MCU 周期性决策。若目标是缩短均衡时间，应优先采用外部 FET 均衡，提高均衡电流，并结合 CB_LOOP_SLOW 提升有效均衡占空比。

本文给出的均衡机制分析与控制策略并不局限于 BQ76907-Q1 这一具体器件，对于采用类似主机控制被动均衡机制的其他器件，以及不同串联数目的超级电容或锂离子电池系统，文中的分析方法与算法框架同样具有参考价值。

7 参考文档

1. BQ76907-Q1 适用于锂离子、锂聚合物、LiFePO4 (LFP)、LTO 电池包 和超级电容器的 2 节至 7 节串联高精度 汽车 电池监测器和保护器 数据表
2. Understanding BQ76905, BQ76907 Voltage Sampling Measurement Loop
3. BQ76907 Technical Reference Manual

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月