

## 电量计电池均衡算法及实现

朱明武 (Mingmo Zhu)

TI Shenzhen

### ABSTRACT

多节电池串联时电池不均衡会影响电池续航时间和电池循环寿命，电池均衡功能尤其必要。本文从电池不均衡的原因出发，介绍基于电压的均衡算法、基于容量的均衡算法，介绍电池被动均衡和主动均衡的两种实现方法，介绍被动均衡的内部均衡和外部均衡两种电路设计，以 TI 阻抗跟踪电量计 [BQ40Z50-R2](#) 为例介绍均衡参数配置。

### Contents

1.	电池不均衡原因及其影响 .....	2
2.	电池均衡算法 .....	2
	2.1 基于电压的均衡算法 .....	2
	2.2 基于容量的均衡算法 .....	3
3.	电池均衡实现方式 .....	3
	3.1 被动均衡与主动均衡 .....	4
	3.2 内部均衡与外部均衡电路设计 .....	5
4.	电量计均衡参数配置 .....	7
	4.1 Balancing Configuration 均衡使能 .....	7
	4.2 Balance Time per mAh Cell 均衡速度 .....	7
	4.3 Balance in Relax 静置均衡 .....	8
5.	总结 .....	8
	参考文献 .....	8

### Figures

Figure 1.	被动均衡示意图 .....	4
Figure 2.	主动均衡示意图 .....	4
Figure 3.	内部均衡电路 .....	5
Figure 4.	用 PMOS 做外部均衡电路 .....	6
Figure 5.	用 NMOS 做外部均衡电路 .....	6

## 1. 电池不均衡原因及其影响

电池不均衡表现为多节电池串联时各节电池电压不相等，尤其在充电末端和放电末端时表现明显。

各节电池电压不相等其实是各节电池满充容量不均衡、或各节电池 SOC 不均衡、或各节电池内阻不均衡等内在原因的外在表现。

- 当满充容量不同的电池配组串联在一起时，串联充电电流相同，但满充容量小的那个电池会先充到更高电压，从而表现为各节电池电压不相等。
- 即使满充容量相同，但 SOC 不同的电池配组串联在一起时，SOC 高的那节电池的电压偏高，从而表现为各节电池电压不相等。
- 即使满充容量相同、SOC 相同，但各节电池的内阻  $R$  不同，则在充放电时  $IR$  压差不同，也会导致电池端电压不同。此外，一些外部因素（比如电池组局部受温或个体电池之间热不均衡）也会导致个体电池老化速率不同从而内阻不均衡。最终都可能表现为各节电池电压不相等。

电池不均衡会影响电池续航时间和电池循环寿命。

- 对电池续航时间的影响，相当于木桶的短板效应。一方面没法充满，充电时电压高的那一节先触发过压保护停止充电，而其它电压低的电池没有充满；另一方面没法放空，放电电压低的那一节先触发欠压保护停止放电，而其它电压高的电池还有很多电量，所以电池续航时间受影响。
- 对电池循环寿命的影响，由于不均衡的那节电池经常经受过压和欠压压力而变得越来越弱，越弱越不均衡，从而影响电池循环寿命，甚至可能影响电池充电安全。

因此，为了延长电池续航时间、延长电池循环寿命，我们需要对多串电池进行均衡管理。

## 2. 电池均衡算法

从前面电池不均衡的原因可知，我们可以基于电压或者基于容量来做为电池均衡判断依据。因此电池均衡算法可以分为基于电压的均衡算法和基于容量的均衡算法两种。

### 2.1 基于电压的均衡算法

基于电压的均衡算法，监测每节电芯电压，根据电压差异来做均衡。基于电压均衡比较容易实现。

市面上主要有两种类型的电压均衡算法：

- **第一种是基本型电压均衡算法。**

均衡启动条件：在充电过程中，每节电芯电压与一个预先设定的门槛电压比较，当该节电芯电压高于门槛值立即启动对该节电池进行均衡，把它电压降起来或延缓它电压上升。

均衡停止条件：不满足均衡启动条件，或充电停止时均衡停止。

这种基本型电压均衡算法逻辑非常简单，但可能出现所有电芯同时均衡，造成电量浪费和被迫延长充电时间。

- 第二种是改善型电压均衡算法。

均衡启动条件：在充电过程中，既要看电压最高那一节电芯电压高于预设的门槛电压 **Cell Balance Threshold**，同时还要比较各节电芯相互之间的最大压差大于预设的门槛压差 **Cell Balance Minimum Delta**，两个条件都满足后才对该节电池进行均衡。

为了降低电池阻抗和线路阻抗对均衡电压的影响（IR 压降），一般选择在电池阻抗比较小、电流比较小的条件下做均衡，比如充电末端。此外，还要避免在锂电池电压平坦区做均衡，因为平坦区微小电压差异会对应较大容量差异。综上两个原因，为避免误均衡，基于电压的均衡算法的启动门槛电压 **Cell Balance Threshold** 一般设在充电末端（电池电压已超过电池平坦区）。

均衡停止条件：不满足均衡启动条件，或其它安全事件需要停止均衡。

[BQ4050](#) 等就是用这种改善型电压均衡算法。详细的实现过程请参考文章 [Cell Balancing in bq208x Advanced Gas-Gauge Designs](#) <http://www.ti.com/lit/slva155>。

## 2.2 基于容量的均衡算法

基于容量的均衡算法，监测每节电芯容量，根据容量差异来做均衡。容量不均衡是电池不均衡的根本原因，根据容量差异做均衡是最合理的。基于容量的均衡算法要求准确跟踪每一节电芯的容量和阻抗，消除阻抗压降影响，因而可以在任何电压任何电流下进行均衡。TI 阻抗跟踪算法电量计已经具备这些优点，跟踪每一节电芯的容量和阻抗。[BQ40Z50-R1/R2](#) 和 [BQ28Z610](#) 等就是用这种基于容量的均衡算法。

基于容量的均衡算法要求电量计能够时刻跟踪每一节电池的准确容量。所以 [BQ40Z50-R1/R2](#) 和 [BQ28Z610](#) 均衡启动的前提是电池容量  $Q_{max}$  已经更新 ( $Update\ Status = 0x0E$ )，以确保 SOC 和容量差  $\Delta Q$  计算准确。然后每当 OCV 更新时，通过  $DOD=f(OCV,T)$  得到每节电芯的  $Cell\_n\_DOD$ ，计算每节电芯与 SOC 最低那节电芯的容量差  $\Delta Q\_n = (Cell\_n\_DOD - Cell\_Lowest\_SOC\_DOD) \times Cell\_n\_Q_{Max}$ 。然后用容量差  $\Delta Q$  除以均衡电流  $I_{cb}$  即可计算每节电芯需要的均衡时间  $Cell\_n\_Bal\_Time = \Delta Q\_n / I_{cb}$ ，亦即需要  $Cell\_n\_Bal\_Time$  时间才能把这个多余的容量差  $\Delta Q$  放掉。电量计会把每节所需的均衡时间  $Cell\_n\_Bal\_Time$  保存。

在 **Normal Mode** 下电量计每一秒都会调用  $Cell\_n\_Bal\_Time$  均衡时间计算功能。比如在充电过程中 (**Charge Mode**)，只要任意一节电芯的均衡时间  $Cell\_n\_Bal\_Time$  不为 0 就会启动该节电池的均衡放电，没有 SOC 限制。

用户也可选择在静置过程中 (**Relax Mode**) 是否均衡，如果任意一节电芯的均衡时间  $Cell\_n\_Bal\_Time$  不为 0 并且 SOC 大于预设阈值 **Min RSOC for Balancing** 就会启动均衡放电。此外在 **Relax Mode** 每隔 **Relax Balance Interval** 时间或者在退出 **Relax Mode** 时都会检查是否已经有效 OCV 更新、电芯之间最大压差是否大于预设阈值 (**Min Start Balance Delta**)，满足条件就会重新计算均衡时间。

## 3. 电池均衡实现方式

按多余能量传递方式，电池均衡实现方式分为被动均衡和主动均衡两种。按均衡电路是否集成，电池均衡实现方式分为内部均衡和外部均衡两种。

### 3.1 被动均衡与主动均衡

被动均衡是把电量最多的那节电芯多出来的电量通过电阻发热消耗掉。图 1 是被动均衡示意图，当均衡开关导通即可对这一节电芯进行放电。被动均衡电路只需要一个均衡开关和电阻即可实现被动均衡，是最简单、低成本、广泛使用的方式。

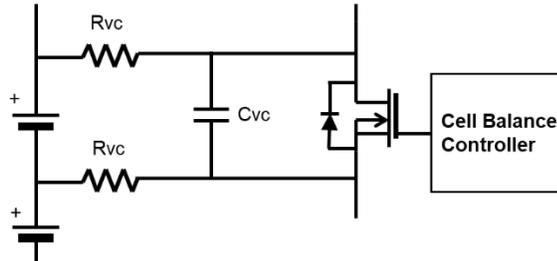


Figure 1. 被动均衡示意图

主动均衡是把电量最多的那节电芯多出来的电量转移给电量最少的那节电芯，或者转移给整串电池，实现能量回收。主动均衡电路比较复杂，一般通过电感或电容等储能元件和开关电源等方法来转移电量，整体方案占空间较大、成本比较高，一般用于大型储能系统。TI [EMB1428+EMB1499](#) 是目前常用的主动均衡方案，如图 2 所示，[EMB1428](#) 通过开关阵列选择电压最高的电芯，通过 [EMB1499](#) 开关电源（带变压器隔离）把电压高那节电芯多余电量转移到整个电池组回收。

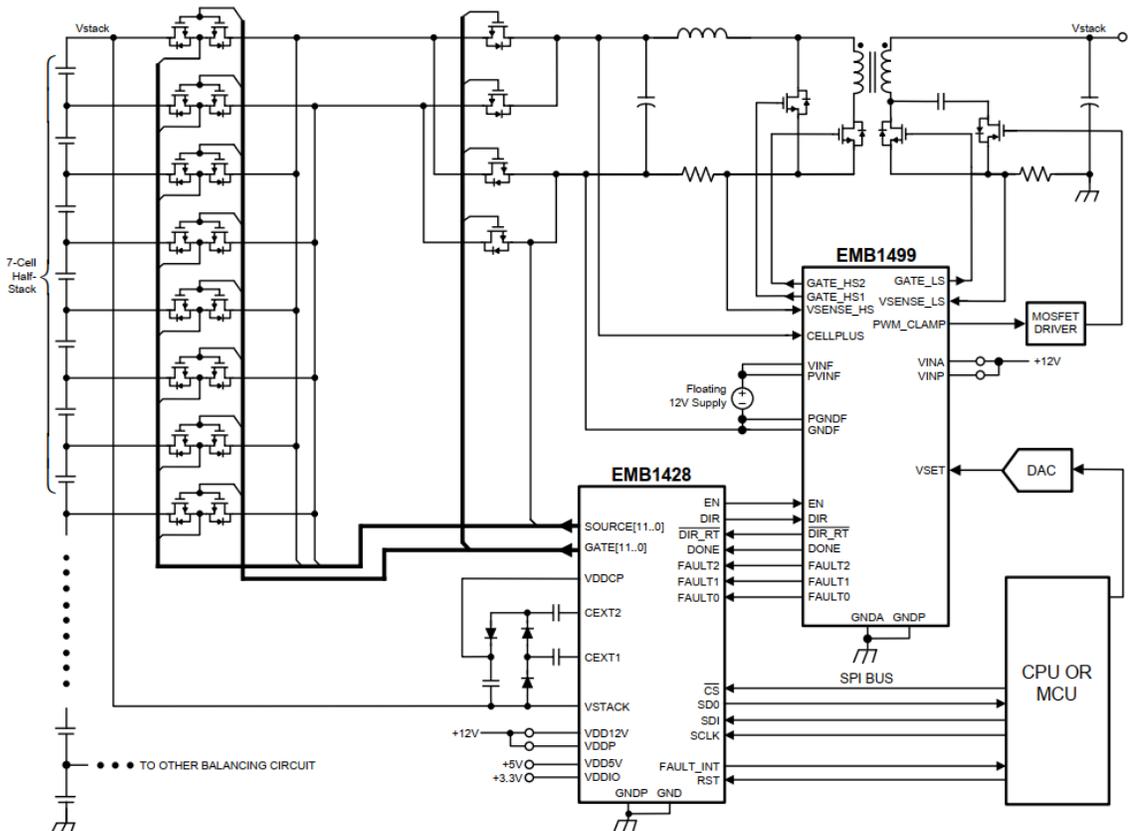


Figure 2. 主动均衡示意图

### 3.2 内部均衡与外部均衡电路设计

按均衡电路是否集成，电池均衡实现方式分为内部均衡和外部均衡两种。对于被动均衡，均衡电路（均衡开关和均衡电阻）可以集成在控制 IC 内部，也可以独立在 IC 外部。内部均衡是指均衡电路集成在 IC 内部，如图 3 所示。

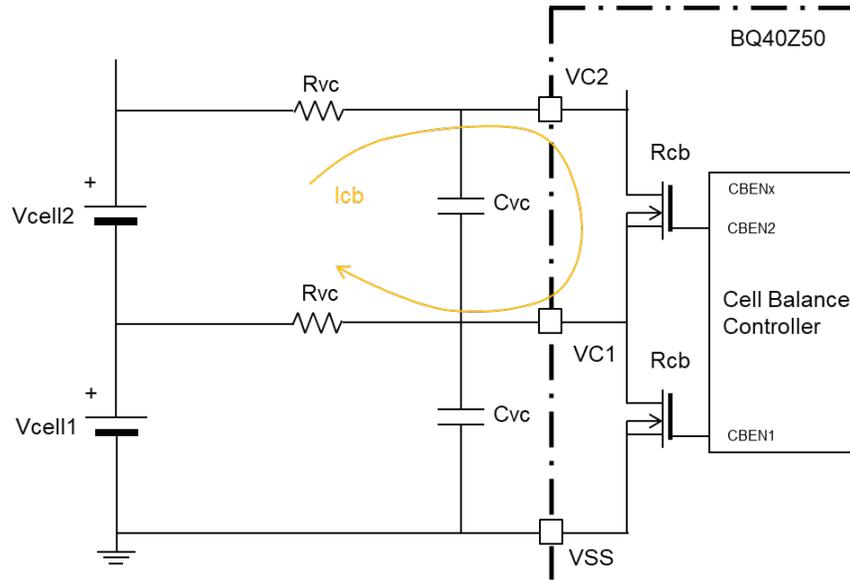


Figure 3. 内部均衡电路

由于 IC 散热考虑一般内部均衡的均衡电流不会很大（比如几 mA、几十 mA 等）。以 BQ40Z50 系列电量计(BQ40Z50-R1, BQ40Z50-R2 等)为例，内部均衡电流  $I_{cb}$  用公式(1)计算。由于 VSS 是 IC 的地，为了避免引起电压偏差，VSS 线上不接电阻，所以 Cell1 均衡电流与其它 Cell 均衡电流不同。

$$\text{Cell1 均衡电流: } I_{cb} = \frac{V_{cell}}{R_{vc} + R_{cb}} \times \text{Duty} \quad \text{公式(1.1)}$$

$$\text{Cell2 及以上均衡电流: } I_{cb} = \frac{V_{cell}}{2 \times R_{vc} + R_{cb}} \times \text{Duty} \quad \text{公式(1.2)}$$

$V_{cell}$  = average cell voltage (for example, 3700 mV for most chemistries)

$R_{vc}$  = resistor value in series to VCx input (for example, 100  $\Omega$ , based on the reference schematic)

$R_{cb}$  = cell balancing FET R<sub>dson</sub>, which is 200  $\Omega$  (Max) for BQ40Z50

Duty = cell balancing duty cycle, which is 75% typ for BQ40Z50

由于均衡电流路径与电芯电压采样路径共用同一路径 VCx，所以需要均衡开关采用占空比(Duty)方式周期性导通和关断，把均衡和采样分开，避免均衡影响电芯电压采样。

外部均衡是把均衡开关放在 IC 外部。很多电量计(比如 BQ40Z50 和 BQ28Z610 等系列)已经集成内部均衡，只需要外部添加 MOSFET 即可实现外部均衡。图 4 是用 PMOS 做外部均衡开关，外部 PMOS 的栅极电压由  $R_{vc}$  和  $R_{cb} + R_{vc}$  分压构成。当均衡使能信号 CBEN 开通内部均衡开关时，PMOS 栅-源形成负压从而导通。

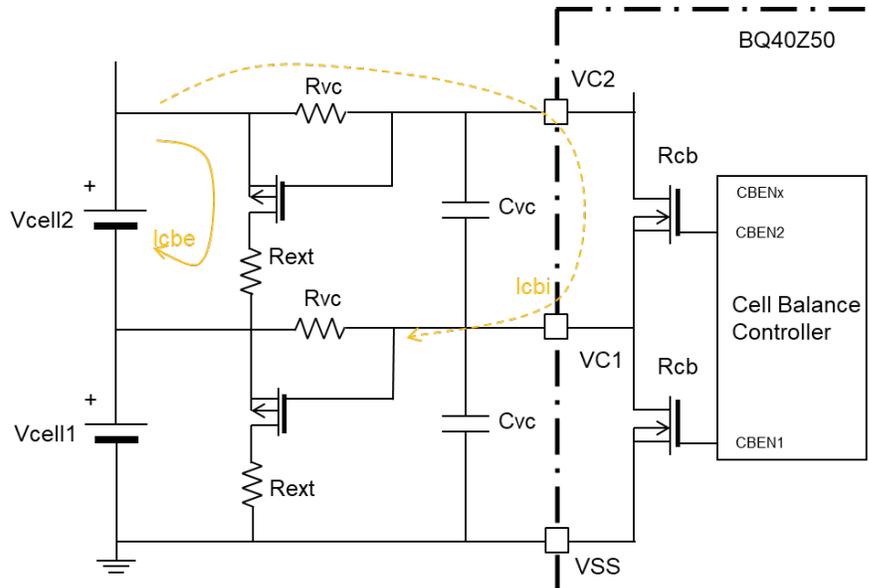


Figure 4. 用 PMOS 做外部均衡电路

图 5 是用 NMOS 做外部均衡开关。外部 NMOS 的栅极电压由 Rvc 和 Rcb+Rvc 分压构成。当均衡使能信号 CBEN 开通内部均衡开关时，NMOS 栅-源形成正压从而导通。由于 VSS 线上没有电阻，所以第一节电芯仍然用 PMOS，第二节以上的电芯可用 NMOS。

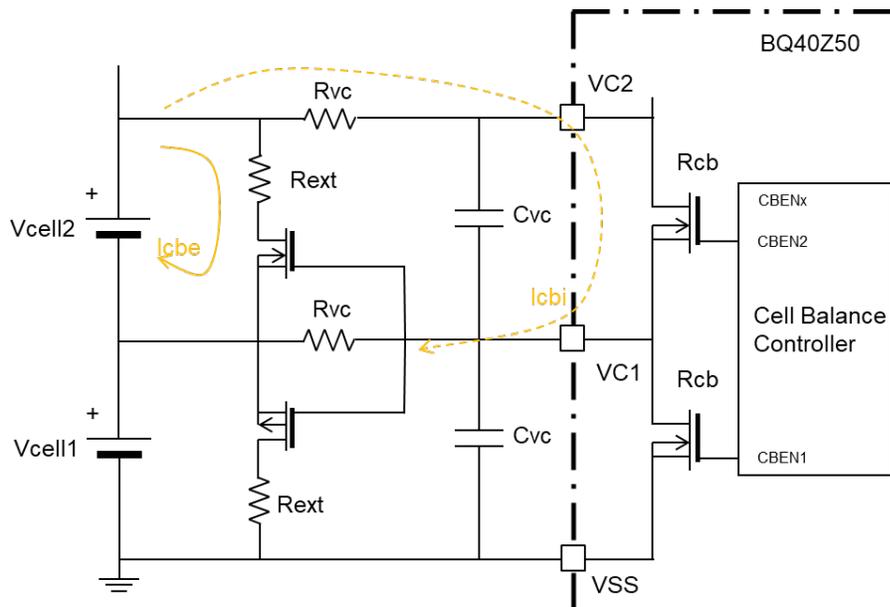


Figure 5. 用 NMOS 做外部均衡电路

外部均衡电流 Icb 由内部开关电流 Icbi 和外部开关电流 Icbbe 组成，用公式(2)计算：

$$\text{Cell1 均衡电流: } I_{cb} = \frac{V_{cell}}{(R_{vc}+R_{cb})||R_{ext}} \times Duty \tag{2.1}$$

$$\text{Cell2 及以上均衡电流: } I_{cb} = \frac{V_{cell}}{(2 \times R_{vc} + R_{cb}) \parallel R_{ext}} \times \text{Duty} \quad \text{公式(2.2)}$$

公式中“||”表示并联，即内部均衡回路阻抗与外部均衡回路阻抗并联。

## 4. 电量计均衡参数配置

以 [BQ40Z50-R2](#) 为例介绍电量计均衡参数配置。

### 4.1 Balancing Configuration 均衡使能

Class	Subclass	Name	Type	Min	Max	Default	Unit				
Settings	Configuration	Balancing Configuration	H1	0x0	0xFF	0x01	Hex				
				7	6	5	4	3	2	1	0
				RSVD	RSVD	CBS	CB_RLX_DOD 0EW	CB_CHG_DOD 0EW	CBR	CBM	CB

Settings: Balancing Configuration [CB] = 1 开启均衡功能（默认充电均衡）。

Settings: Balancing Configuration [CBR] = 1 开启静置均衡 (Relax Mode)，需要同时设置[CB]=1。

Settings: Balancing Configuration [CBS] = 1 开启睡眠均衡 (Sleep Mode)，需要同时设置[CB]=1。允许在 Sleep Mode 做均衡。启动条件是在 Sleep Mode 持续超过 Start Time for Bal in Sleep 时间（默认 100 小时），并且 RSOC 大于 Start Rsoc for Bal in Sleep 门槛（默认 95%）。一旦睡眠均衡启动后，当 RSOC 小于 Stop Rsoc for Bal in Sleep 时会停止睡眠均衡。

Settings: Balancing Configuration [CBM] = 1 同一时刻只开一节均衡(外部均衡)，=0 同一时刻可开多节均衡(内部均衡)。BQ40Z50 系列电量计建议[CBM] = 1，不管是否使用外部均衡 MOSFET。

当有任意一节在均衡时 OperationStatus()[CB] 状态位就会置位，反之就会[CB]清零。

### 4.2 Balance Time per mAh Cell 均衡速度

Advanced Charging Algorithm: Cell Balancing Config: Balance Time per mAh Cell 1

Advanced Charging Algorithm: Cell Balancing Config: Balance Time per mAh Cell 2-4

从前文容量均衡算法可知，[BQ40Z50](#) 系列电量计会计算每节的均衡时间  $\text{Cell}_n\text{Bal\_Time} = \Delta Q_n / I_{cb}$ 。因此用户需要设置均衡速度 Balance Time per mAh Cell = 1mAh /  $I_{cb}$ ，即每 1 mAh 容量用均衡电流  $I_{cb}$  放电要多久放完。

内部均衡速度从公式(1)  $I_{cb}$  的倒数计算。

$$\text{Balance Time per mAh Cell 1} = \frac{1\text{mAh}}{I_{cb}} = \frac{3600\text{mAs} \times (R_{vc} + R_{cb})}{V_{cell} \times \text{Duty}} \quad \text{公式(3.1)}$$

$$\text{Balance Time per mAh Cell 2-4} = \frac{1\text{mAh}}{I_{cb}} = \frac{3600\text{mAs} \times (2 \times R_{vc} + R_{cb})}{V_{cell} \times \text{Duty}} \quad \text{公式(3.2)}$$

外部均衡速度从公式(2)  $I_{cb}$  的倒数计算。

$$\text{Balance Time per mAh Cell 1} = \frac{1\text{mAh}}{I_{cb}} = \frac{3600\text{mAs} \times ((R_{vc} + R_{cb}) \parallel R_{ext})}{V_{cell} \times \text{Duty}} \quad \text{公式(4.1)}$$

$$\text{Balance Time per mAh Cell 2-4} = \frac{1\text{mAh}}{I_{cb}} = \frac{3600\text{mAs} \times ((2 \times R_{vc} + R_{cb}) \parallel R_{ext})}{V_{cell} \times \text{Duty}} \quad \text{公式(4.2)}$$

### 4.3 Balance in Relax 静置均衡

Advanced Charging Algorithm: Cell Balancing Config: Relax Balance Interval

Advanced Charging Algorithm: Cell Balancing Config: Min Start Balance Delta

如前文介绍在 Relax Mode 每隔 Relax Balance Interval 时间会检查是否已经有效 OCV 更新、电芯之间最大压差是否大于预设阈值 (Min Start Balance Delta)，满足条件就会重新计算均衡时间满足条件重新计算均衡时间。

Advanced Charging Algorithm: Cell Balancing Config: Min RSOC for Balancing

如前文介绍在 Relax Mode 需要有任意一节电芯的均衡时间 Cell\_n\_Bal\_Time 不为 0 并且 SOC 大于预设阈值 Min RSOC for Balancing 才会启动静置均衡放电。

## 5. 总结

本文分析了电池不均衡的原因、影响，介绍了基于电压和基于容量的两种均衡算法，介绍了主动均衡和被动均衡两种实现方法，着重介绍了被动均衡的电路设计，包括用 NMOS 和 PMOS 两种不同均衡电路实现方法，并且以 TI 阻抗跟踪电量计 [BQ40Z50-R2](#) 为例介绍均衡参数配置。

## 参考文献

1. BQ40Z50-R2 datasheet, <http://www.ti.com/lit/gpn/BQ40Z50-R2>
2. BQ40Z50-R2 Technical Reference Manual, <http://www.ti.com/lit/pdf/sluubk0>
3. Fast cell balancing using external MOSFET, [www.ti.com/slva420-aaj](http://www.ti.com/slva420-aaj)
4. Cell Balancing Using the bq20zxx, <http://www.ti.com/lit/an/slva340c/slva340c.pdf>

## 重要声明和免责声明

TI 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任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 上其他适用条款/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。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司