

BQ77915 被动均衡的介绍及相关注意事项

Hugo Zhang 张楚涛 TI 电量计产品技术支持

摘要

多串数锂电池包被广泛应用于电动工具、扫地机、吸尘器、电动自行车、基站备用电源和储能系统等等。由于锂电池的特性，需要对其进行严格且精确的监控和保护。TI 的 3~5 串的硬件保护方案 BQ77915 因为简单易用，和高性价比，被广泛应用于电动工具、吸尘器、电动自行车的锂电池的监控和保护方案上。而均衡功能对多串数锂电池包来说是必备的功能。本文将详细介绍 BQ77915 的被动均衡功能及其相关注意事项。

目录

1, 概述	2
2, BQ77915 的均衡功能介绍	2
2.1, BQ77915 均衡功能的相关参数	2
2.2, 均衡时的电压波形	3
2.3, 开启均衡的条件	5
2.4, 均衡控制算法	5
3, 级联时的均衡控制方法	8
3.1, 级联时（没过压保护）的均衡控制方法	8
3.2, 级联时（过压保护后）的均衡控制方法	10
4, BQ77915 的被动均衡的注意事项	11
5, 总结	12
参考文献	12

图

图 1: BQ77915 内部均衡和外部均衡简化电路图	3
图 2: BQ77915 均衡功能的相关参数	4
图 3: 单通道均衡的波形	5
图 4: 多通道同时均衡的波形	6
图 5: 充电时均衡最高电压的电芯	7
图 6: 充电时均衡多节高于 V_{FC} 的电芯	8
图 7: 充电时各节电芯电压比较接近的情况	8
图 8: 过压保护时的均衡	9
图 9: 两个 BQ77915 级联的电路图	11
图 10: 多个循环后导致电压分化严重的情况	13

表

表 1: OCDP 管脚的电阻阻值与 OCD1/OCD2 的保护延迟时间	9
表 2: VHYST 对均衡的影响	12

1, 概述

BQ77915 是纯硬件的保护方案。与 BQ76952 等模拟前端 (AFE) 相比, BQ77915 内部没有 ADC, 也没有与主机 MCU 通讯的接口。芯片内部是由比较器, 状态机等来实现相关保护和均衡功能。其控制均衡的方式跟 AFE 有很大的不同。所以有必要专门详细介绍一下。

2, BQ77915 的均衡功能介绍

BQ77915 的均衡是在芯片内部通过 MOSFET 短接相邻的 VCn 管脚, 从而产生流经 R_{IN} , R_{BAL} (芯片内部 MOSFET 的导通阻抗) 和 R_{IN} 的均衡电流。均衡电流的大小等于该节电芯的电压除以该回路的阻抗。通过这种方式, 从而实现把电压偏高的电芯的能量以电阻发热的形式耗散掉, 从而实现电压均衡的目的。

BQ77915 内部均衡最大支持 50mA 的均衡电流, 也可以外加 MOSFET 和功率电阻来实现外部均衡, 从而获得更大的均衡电流, 如图 1 所示。

关于内部均衡和外部均衡, 可参考应用笔记《TI 模拟前端(AFE)被动均衡的介绍及相关考虑》, 链接如下:
<http://www.ti.com/cn/lit/ZHCACR1>。

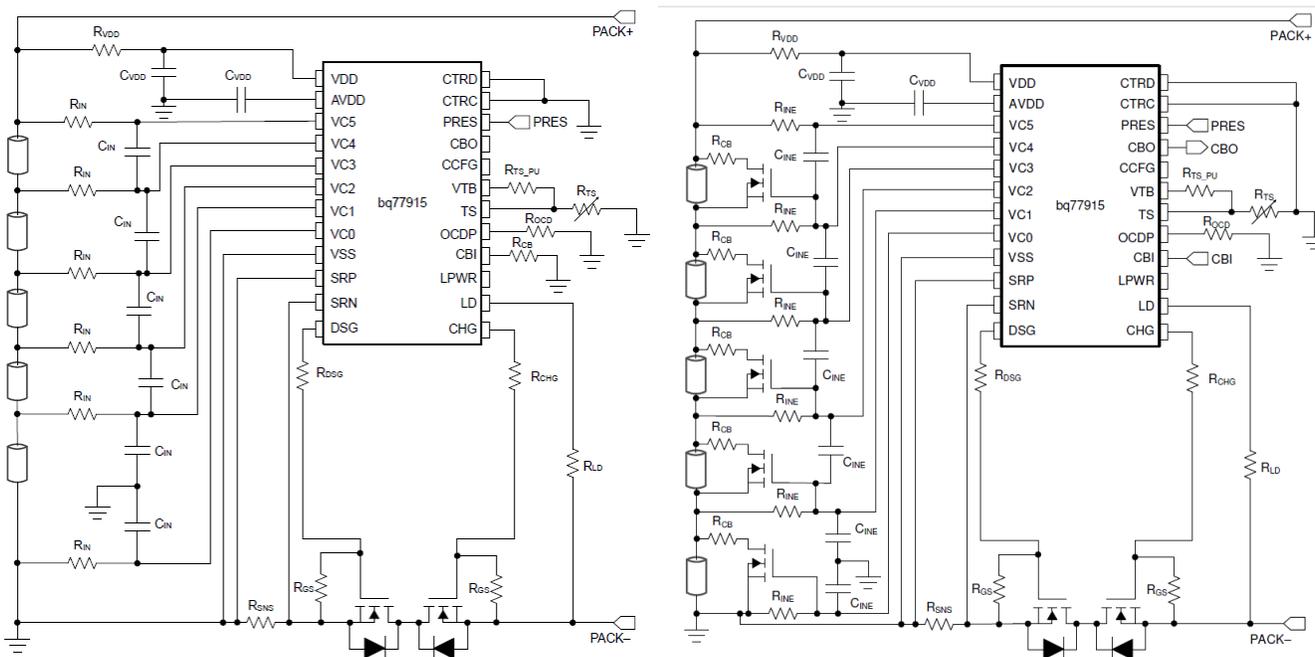


图 1: BQ77915 内部均衡和外部均衡简化电路图

2.1, BQ77915 均衡功能的相关参数

- V_{OV}**: 过压保护电压点, 可选范围 3000mV~4575mV, 步长 25mV。
- V_{HYS_OV}**: 过压保护迟滞电压, 有四档可选: 0mV, 100mV, 200mV 和 400 mV。
- V_{START}**: 允许开启均衡的电压阈值, 有两档可选: 3.5V 和 3.8V。
- V_{FC}**: 满充电压点, 比 V_{OV} 低 50-200mV, 通过 V_{HYST} 进行配置。
- V_{HYST}**: 过压电压点 V_{OV} 和充满电压点 V_{FC} 的迟滞, 有四档可选: 50mV, 100mV, 150mV 和 200mV。
- V_{STEP}**: 均衡高阈值和低阈值的差异, 有四档可选: 50mV, 100mV, 150mV 和 200mV。
- V_{CBIL}**: CBI 管脚输入低电平的阈值, 最大值 0.5V。
- t_{CBIL_DEG}**: CBI 管脚输入低电平的延迟时间, 典型值是 100mS。
- R_{BAL}**: 芯片内部的均衡 MOSFET 的导通阻抗, 典型值是 12 欧。
- D_{BAL}**: 只有单节电芯在均衡时的均衡占空比, 典型值是 90%。
- t_{BAL}**: 奇数通道和偶数通道交替均衡时, 各自的持续时间, 典型值是 521ms。

其中 V_{OV}, V_{HYS_OV}, V_{START}, V_{HYST} 和 V_{STEP} 是可选配的参数。BQ77915 系列可以根据客户具体需求, 在芯片自动化测试时烧写固化到芯片里。然后给它指定一个后缀, 如 BQ7791500, BQ7791501 等等。

注: 相关参数一经烧写固化后, 就不能再改变了, 所以也叫单次编程, One Time Program (OTP)。

CELL BALANCING						
V _{HYST}	Hysteresis between overvoltage and full charge voltage range (V _{OV} – V _{FC} , 4 steps of 50 mV)	T _A = 25°C	50	200	mV	
V _{STEP}	Difference between the cell balancing threshold voltages (V _{CBTH} – V _{CBTL} , 4 steps of 50 mV)	T _A = 25°C	50	200	mV	
V _{CBIL}	CBI low threshold			0.5	V	
t _{CBIL_DEG}	CBI deglitch period		100	ms		
R _{BAL}	Cell balancing internal FET resistance	Cell1 through Cell5 = 4 V, V _{DD} = 20 V	8	12	20	Ω
D _{BAL}	Cell balancing duty cycle	Only one cell balanced in the stack	90 %			
t _{BAL}	Odd and even cell group balancing duration		521		ms	

图 2: BQ77915 均衡功能的相关参数

2.2, 均衡时的电压波形

图 3 是第一通道 Cell1 进行均衡的波形。在进行均衡时, 因为芯片内部的均衡 MOSFET 导通, VC0 管脚和 VC1 管脚的压差很小。压差主要是落在外部的两个 R_{IN} 电阻上。均衡持续一段时间后, 会暂时停下来, 对所有电芯电压进行监控。关于均衡的时序参考下面图 4 的详细描述。

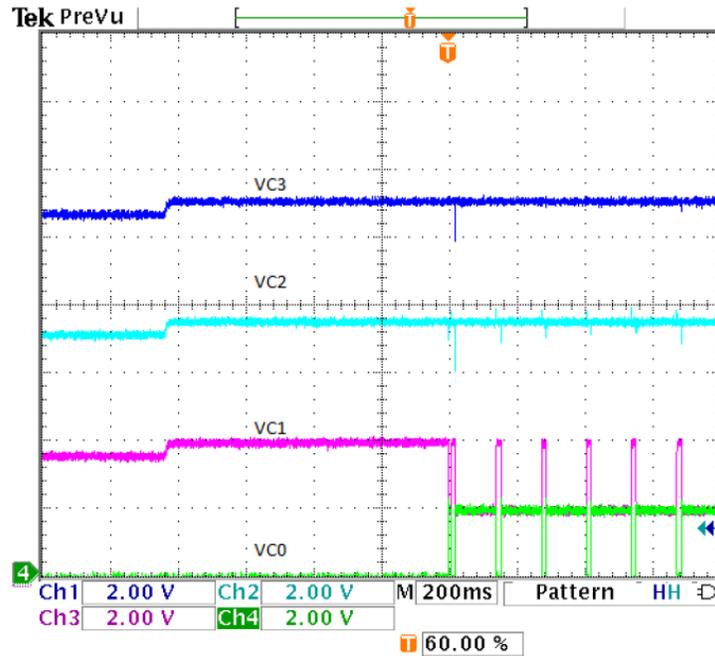


图 3：单通道均衡的波形

图 4 是多通道进行均衡的波形。奇数通道，即通道 1（VC1-VC0）和通道 3（VC3-VC2）同时均衡。偶数通道，即通道 2（VC2-VC1）跟通道 1 和通道 3 错开时间均衡。

跟均衡时序相关的两个参数是 t_{BAL} 和 $DBAL$ 。 t_{BAL} 是奇数通道和偶数通道交替均衡时，各自的持续时间，典型值是 521ms，如下图所示。在 t_{BAL} 的时间内，分为 4 个周期，每个周期 130ms。在每个周期里，又分为 20 个时间窗口，每个时间窗口是 $130ms / 20 = 6.5ms$ 。其中有两个时间窗口是不做均衡，均衡动作会停下来。第一个 6.5ms 时间窗口，均衡会停下来，但也不做电芯电压的监控。这是为了在均衡停止后，有 6.5ms 的时间让外部的 RC 网络电压稳定，防止触发误保护。第二个 6.5ms 时间窗口，进行电压监控，用于 OV 和 UV 的判断。其余 18 个时间窗口会一直在做均衡。所以只有单节电芯在均衡时的均衡占空比，典型值是 90%。如果是多通道奇偶交替均衡，均衡占空比是 45%。

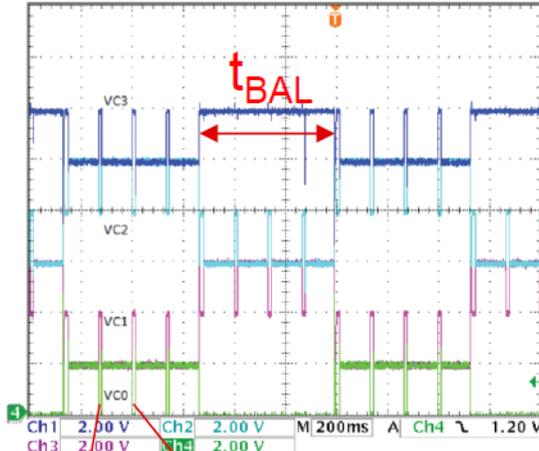


Figure 6. Balancing cells 1, 2, and 3

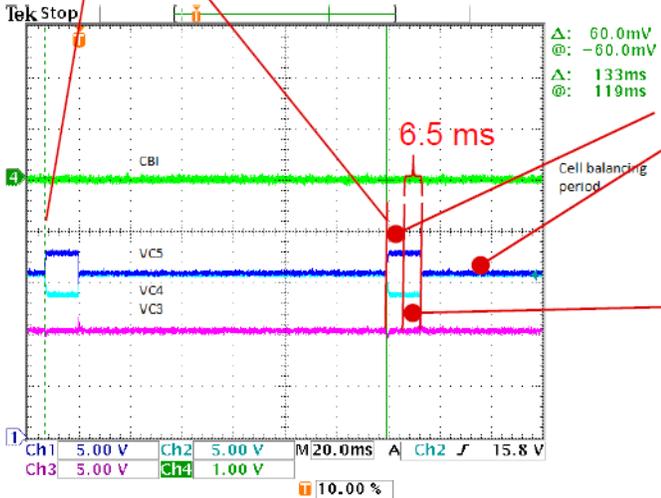


图 4: 多通道同时均衡的波形

2.3, 开启均衡的条件

BQ77915 开启均衡的条件:

- 1, CBI 为低;
- 2, 在充电状态;
- 3, 电压差异条件满足: 某节电芯电压超过设定的 V_{START} , 且某节电芯电压高于 V_{CBTH} ; 和某节电芯电压低于 V_{CBTL} ;

2.4, 均衡控制算法

下面将以几个具体的例子来描述 BQ77915 的均衡控制算法。

例子 1，如图 5 所示。蓝色方框代表 Cell1~Cell5 的电压。蓝色方框外面有一圈红色的代表该电芯正在进行均衡。

第一阶段，初始的 $V_{CBTL}=V_{START}$ ， $V_{CBTH}=V_{STEP}+V_{CBTL}$ 。在这个阶段，最高电芯电压 V_{Cell4} 虽然大于 V_{CBTL} ，但由于还没有大于 V_{CBTH} ，所以不进行均衡。

第二阶段，随着充电的进行，所有电芯电压在上升。最高电芯电压 V_{Cell4} 已经大于 V_{CBTH} ，且最低电芯电压 Cell1 还是低于 V_{CBTL} ，所以开始对 Cell4（红色框的点）进行均衡。

第三阶段，随着充电的进行，所有电芯电压（包括被均衡的 Cell4）继续上升。因为最低电压的电芯 Cell1 已经高于原来的 V_{CBTL} ，所以 V_{CBTH} 和 V_{CBTL} 都同时增加一个步长。此时因为最高电芯电压 V_{Cell4} 还是低于新的 V_{CBTH} ，所以不进行均衡。

第四阶段，随着充电的进行，所有电芯电压在上升。最高电芯电压 V_{Cell4} 已经大于 V_{CBTH} ，且最低电芯电压 Cell1 还是低于 V_{CBTL} ，所以开始对 Cell4（红色框的点）进行均衡。

第五阶段，同第三阶段。

简单总结如下：在电芯电压还没达到 V_{FC} 之前，当最高电芯电压大于 V_{CBTH} 且最低电芯电压小于 V_{CBTL} ，且满足 CBI 为低和在充电状态的条件，则会对最高那节电芯进行均衡。

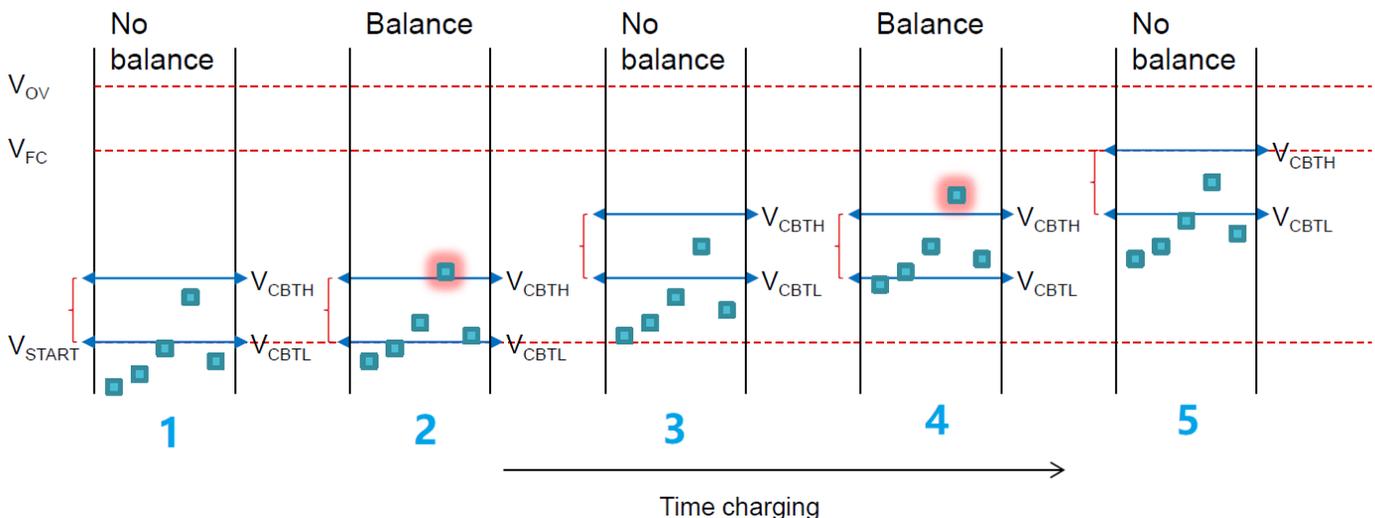


图 5：充电时均衡最高电压的电芯

例子 2，接图 5 的第五阶段，如图 6 所示。

第六阶段，随着充电的进行，所有电芯电压在上升。其中最高电芯电压 V_{Cell4} 已经大于 V_{FC} ，所以开始对 Cell4 进行均衡。

第七阶段，随着充电的进行，最低电压的电芯 Cell1 也大于 V_{CBTL} ，但因为最高电芯电压 V_{Cell4} 已经大于 V_{FC} ，所以还是会对 Cell4 进行均衡。

第八阶段，随着充电的进行， V_{cell3} 也已经大于 V_{FC} ，开始对 Cell3 进行均衡。此时会对 Cell3 和 Cell4 都进行均衡。BQ77915 会对 Cell3（奇数通道）和 Cell4（偶数通道）在时间上错开进行均衡。此时充电过程已经从恒流模式切换到恒压模式，Cell4 的电压并不会增加很快。

第九阶段，随着充电的进行， V_{cell5} 也已经大于 V_{FC} ，开始对 Cell5 进行均衡。此时会对 Cell3，Cell4 和 Cell5 都进行均衡。BQ77915 会对 Cell3 和 Cell5（奇数通道），Cell4（偶数通道）在时间上错开进行均衡。Cell3 和 Cell5 是同时均衡。

简单总结如下：只要电芯电压超过 V_{FC} 的通道，且满足 CBI 为低和在充电状态的条件，都会进行均衡。

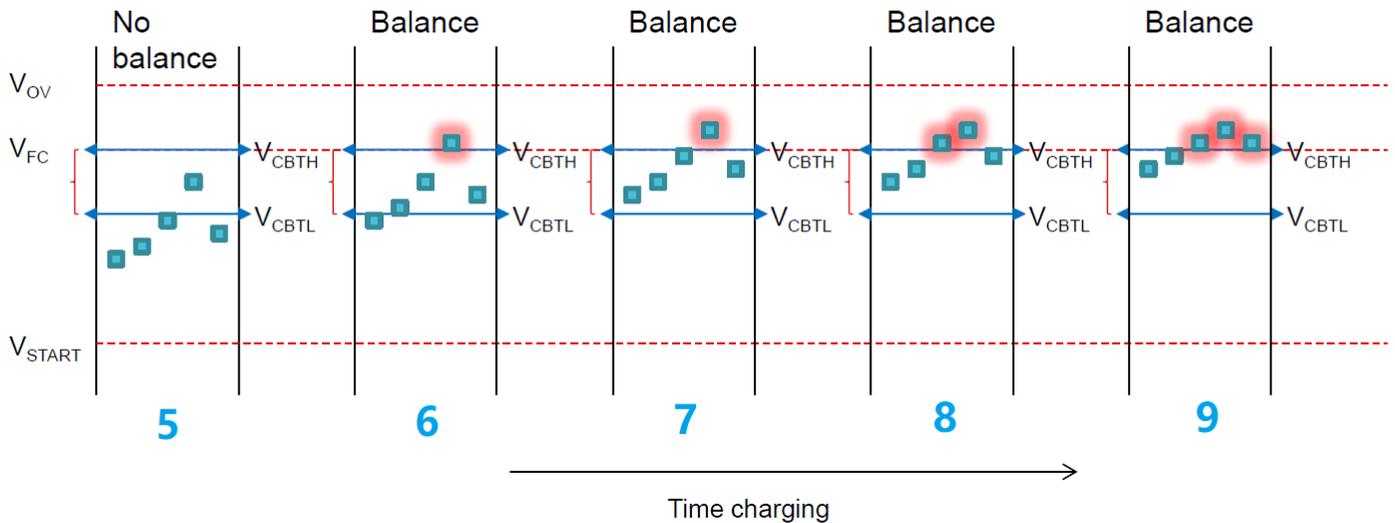


图 6: 充电时均衡多节高于 V_{FC} 的电芯

例子 3，如图 7 所示是各节电芯电压比较接近的情况。在第一，二，三和四阶段，由于不满足最高电芯电压大于 V_{CBTH} 且最低电芯电压小于 V_{CBTL} ，所以不会进行均衡。直到第五阶段，快要充满时，最高电芯电压 V_{Cell4} 已经大于 V_{FC} ，才会对 Cell4 进行均衡。

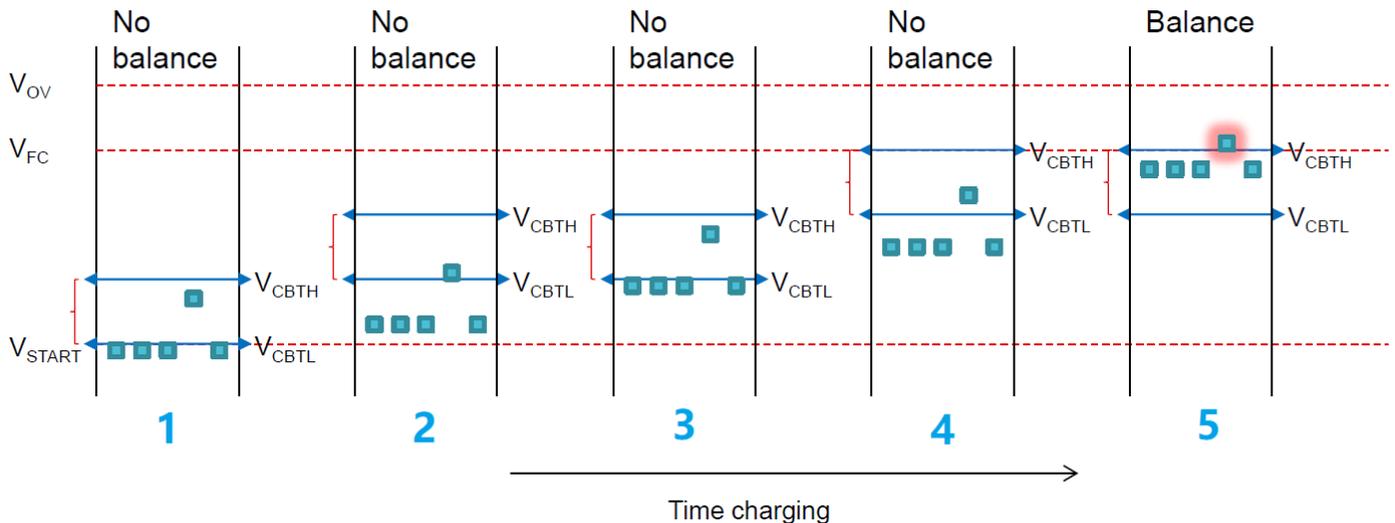


图 7：充电时各节电芯电压比较接近的情况

例子 4，过压保护（OVP）后的均衡控制情况，如图 8 所示。

第一阶段，最高电压的电芯 V_{cell4} 大于 V_{FC} ，正在对 Cell4 进行均衡。

第二阶段，随着充电的进行，Cell4 的电压超过过压保护电压点 V_{OV} ，发生过压保护，充电 MOSFET 关断。停止充电。

第三阶段，已经停止充电，但还是会对过压状态的 Cell4 进行均衡。Cell4 因为均衡，电压在下降。

第四阶段，Cell4 因为持续均衡，电压继续在下降。

第五阶段， V_{cell4} 低于 V_{FC} ，停止均衡。各节电芯达到相对均衡的状态。

简单总结如下：发生 OVP 的通道会一直均衡，即使没有充电电流，直到该通道的电芯电压低于 V_{FC} 或 $V_{OV} - V_{HYS_OV}$ 。

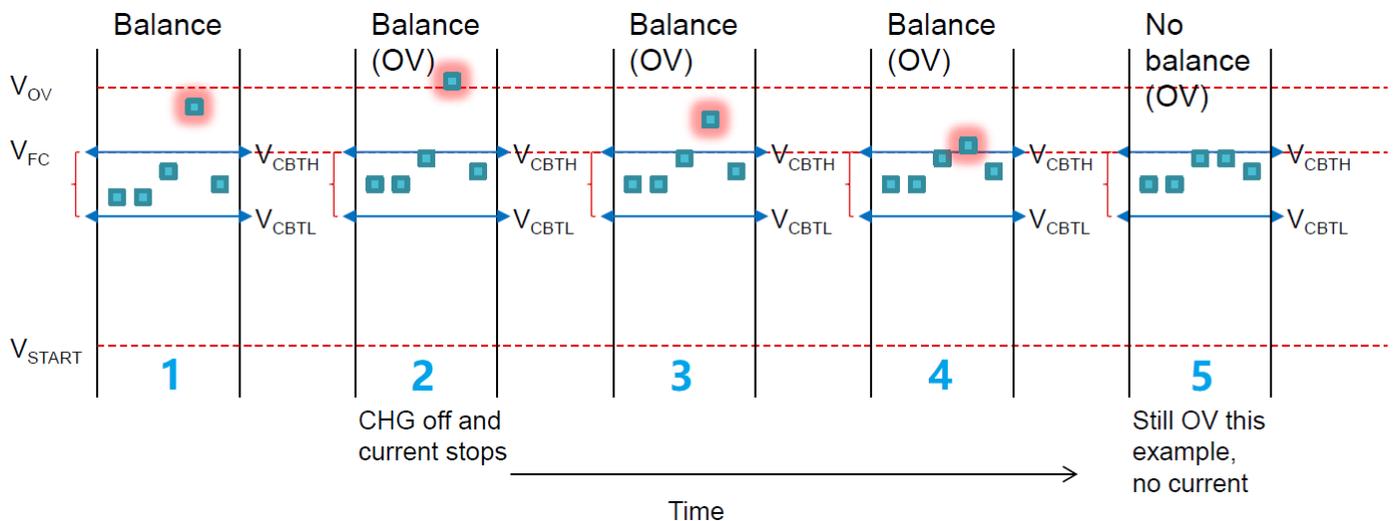


图 8：过压保护时的均衡

3，级联时的均衡控制方法

3.1，级联时（没过压保护）的均衡控制方法

多个 BQ77915 级联时，跟均衡控制相关的管脚包括：CBI，CBO 和 OCPD。

CBI 管脚：均衡控制输入管脚。被拉低时允许均衡。浮空时，会禁止均衡。

CBO 管脚：均衡控制输出管脚。通过一个 10k 电阻连接上面一个 BQ77915 的 CBI 管脚。如果只有一个 BQ77915，那 CBO 管脚可以浮空。

OCDP 管脚：对于最底下的 BQ77915，可以接六种阻值的电阻，用于设定 OCD1 和 OCD2 的保护延迟时间，详见表 1。对于非最底下的 BQ77915，需要接 10M 的电阻。

表 1: OCDP 管脚的电阻阻值与 OCD1/OCD2 的保护延迟时间

Resistor Value	OCD1 Delay	OCD2 Delay
750 kΩ±1%	1420 ms	700 ms
604 kΩ±1%	700 ms	350 ms
487 kΩ±1%	350 ms	180 ms
383 kΩ±1%	180 ms	90 ms
294 kΩ±1%	90 ms	45 ms
196 kΩ±1%	45 ms	20 ms
100 kΩ±1%	EEPROM Delay Options (EC Table)	

当没有过压保护时，最底下的 BQ77915 开启均衡的条件跟单个 BQ77915 开启均衡条件是一样的，即

- 1, CBI 为低;
- 2, 在充电状态;
- 3, 电压差异条件满足: 某节电芯电压超过设定的 V_{START} , 且某节电芯电压高于 V_{CBTH} ; 和某节电芯电压低于 V_{CBTL} ;

对于非最底下的 BQ77915，因为其 SRN 和 SRP 短接在一起，所以不知道是否在充电状态。其开启均衡的条件是:

- 1, CBI 为低;
- 2, OCDP 接 10M 电阻;
- 3, 电压差异条件满足: 某节电芯电压超过设定的 V_{START} , 且某节电芯电压高于 V_{CBTH} ; 和某节电芯电压低于 V_{CBTL} ;

以图 9 为例，最底下的 BQ77915 如果检测到 CBI 为低且在充电状态，则允许均衡，且会让本身的 CBO 抽 1uA 的电流。上方的 BQ77915 的 CBI 因为被抽 1uA 电流，所以是低电平。而且 OCDP 接 10M 电阻，所以允许均衡，且会让本身的 CBO 抽 1uA 的电流，即把允许均衡的信号继续往上方的 BQ77915 传递。各 BQ77915 会根据电压差异条件是否满足来决定是否开启均衡动作。

如果是最底下的 BQ77915 发生过压保护，充电管会关断，停止充电。此时其 CBI 为低且过压保护发生，开启均衡的条件满足，会对过压的电芯进行均衡。同时，发生过压保护后最底下的 BQ77915 的 CBO 不抽 1uA 电流，从而向上禁止了中间和最上面的 BQ77915 的均衡。

如果是中间的 BQ77915 发生过压保护，首先中间 BQ77915 的 CHG 管脚输出低电平，所以最下面的 BQ77915 的 CTRC 管脚为低电平。产生三个动作：

- (1)，最下面的 BQ77915 因为 CTRC 管脚为低电平，所以 CHG 管脚输出低电平，关断充电管，退出充电状态。所以最下面的 BQ77915 不满足在充电状态，禁止均衡。
- (2)，最下面的 BQ77915 因为 CTRC 管脚为低电平，会让其 CBO 抽 1uA 电流，从而使得中间的 BQ77915 的 CBI 为低电平。所以中间的 BQ77915 满足开启均衡的条件，允许均衡。
- (3)，中间的 BQ77915 因为过压保护，其 CBO 不抽 1uA 电流，从而向上禁止了最上面的 BQ77915 的均衡。

如果是最上面的 BQ77915 发生过压保护，最上面的 BQ77915 的 CHG 管脚输出低电平，这会产生三个动作：

- (1)，中间的 BQ77915 的 CTRC 管脚为低电平。让中间的 BQ77915 的 CBO 抽 1uA 电流，从而使得最上面的 BQ77915 的 CBI 为低电平。所以最上面的 BQ77915 满足开启均衡的条件，允许均衡。
- (2)，因为中间的 BQ77915 的 CTRC 管脚为低电平，所以中间的 BQ77915 的 CHG 管脚也为低电平。这会让最下面的 BQ77915 的 CTRC 管脚为低电平，所以最下面的 BQ77915 的 CHG 管脚也为低电平。关断充电管，退出充电状态。所以最下面的 BQ77915 不满足在充电状态，禁止均衡。
- (3)，因为最下面的 BQ77915 的 CTRC 管脚为低电平，会让其 CBO 抽 1uA 电流，从而使得中间的 BQ77915 的 CBI 为低电平。所以中间的 BQ77915 满足开启均衡的条件，允许均衡。

4, BQ77915 的被动均衡的注意事项

关于被动均衡，在参数选择上需要特别注意 V_{HYST} 的选择。下面以 BQ7791508 为例进行描述。

BQ7791508 的相关参数包括： $V_{OV} = 4200mV$ ， $V_{HYS_OV} = 100mV$ ， $V_{HYST} = 100mV$ 。在表 2 的 stage 1 和 stage2，在充电状态，电芯电压差异 10mV。到 stage3，Cell4 电压达到 4200mV，触发过压保护。到 stage4，停止充电，Cell1, 2, 3, 5 的电压有所回落。但因为 Cell4 还在均衡，电压继续下降。直到 stage5，Cell4 电压低于 $V_{OV} - V_{HYS_OV}$ (=4100mV) 或低于 $V_{OV} - V_{HYST}$ (=4100mV)，才停止均衡。从结果来看，停止均衡后电芯之间的差异变成 70mV，反而更不均衡了。

表 2: V_{HYST} 对均衡的影响

		Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	Cell5
Stage 1	Charging	4095	4095	4095	4105	4095
Stage 2	Charging	4110	4110	4110	4120	4110
Stage 3	Charging	4180	4180	4180	4200	4180
Stage 4	Stop charge	4170	4170	4170	4150	4170
Stage 5	Stop charge	4170	4170	4170	4100	4170

图 10 是 $V_{OV} = 4200mV$ ， $V_{HYS_OV} = 100mV$ ， $V_{HYST} = 100mV$ 的实测结果。13 节电芯，3 个 BQ77915 级联。每次充满后静置足够长时间，记录各节电芯的电压。然后开始放电-静置-充电-静置-放电，循环。可见，因为过压后电压需要低于 4100mV 才停止均衡，最终多个循环后导致电压分化严重。

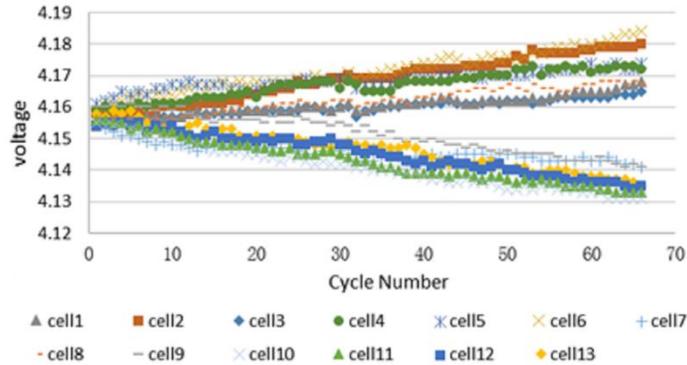


图 10: 多个循环后导致电压分化严重的情况

规避方法是提高 $V_{ov} - V_{HYS_OV}$ 或 $V_{ov} - V_{HYS}$ 。由于 V_{HYS_OV} 只有有四档可选：0mV，100mV，200mV 和 400mV。通常 V_{HYS_OV} 不会选择 0mV，否则会充电-保护-释放-充电-保护-释放的振荡现象。所以 V_{HYS_OV} 最小可选的是 100mV。 V_{HYS} 有四档可选：50mV，100mV，150mV 和 200mV。所以 V_{HYS} 只能选择 50mV 这一档，来规避上述的问题。

5, 总结

本文详细介绍了 BQ77915 在单个芯片，以及多个芯片级联时的均衡机制。可以帮助读者详细理解 BQ77915 的均衡功能。同时提出在选择参数 V_{HYS} 时要注意的地方，以帮助读者在 BQ77915 选型时规避可能存在的问题。

参考文献

BQ77915 Datasheet, <https://www.ti.com/lit/gpn/bq77915>

Stacking Implementations with BQ77915 (Rev. A), <https://www.ti.com/lit/pdf/slua906>

TI 模拟前端(AFE)被动均衡的介绍及相关考虑, <http://www.ti.com/cn/lit/ZHCACR1>

重要声明和免责声明

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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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](#) 或 [ti.com](#) 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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司