

TI 模拟前端(AFE)被动均衡的介绍及相关考虑

Hugo Zhang 张楚涛 TI 电量计产品技术支持

Shubiao Wang 王书彪 TI FAE

摘要

多串数锂电池包被广泛应用于电动工具、吸尘器、电动自行车、基站备用电源和储能系统等。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 模拟前端(AFE, Analog Front End)被广泛应用到这些应用的锂电池的监控和保护方案上。为了克服多节串联电芯的电压不一致问题，模拟前端 (AFE) 一般都集成了被动均衡的功能。本文将详细介绍 TI 多种模拟前端 (AFE) 的被动均衡功能，以及相应的注意事项。

目录

1, 概述	2
2, BQ76940 和 BQ76952 的均衡	2
2.1, BQ76940 和 BQ76952 的内部均衡方式	2
2.2, BQ76940 和 BQ76952 的外部均衡方式	3
2.3, BQ76940 和 BQ76952 的外部均衡的注意事项	4
2.3.1, 外部均衡 MOSFET 阈值的注意事项	4
2.3.2, 外部均衡 MOSFET 在电池包短路时的注意事项	4
2.3.3, 均衡 MOSFET 使用 P-MOSFET 在乱序上电时的注意事项	5
2.4, BQ76940 被动均衡的注意事项	6
2.5, BQ76952 被动均衡的注意事项	9
3, BQ76PL455A-Q1 的均衡方式	10
4, BQ79616-Q1 的均衡方式	11
4.1, 线束对均衡时的电压精度的影响	11
4.2, 外部均衡的 RC 的考虑	12
5, 总结	14
参考文献	14

图

图 1: 内部均衡电路示意图	3
图 2: 用 NMOS 做外部均衡电路	3
图 3: 用 PMOS 做外部均衡电路	4
图 4: 短路瞬间各节点的电压	5

图 5: P-MOSFET 在乱序上电时的注意事项.....	6
图 6: BQ76940 相邻两个通道同时均衡.....	7
图 7: BQ76940 相邻三个通道同时均衡.....	8
图 8: BQ76940 隔一个通道的两个通道同时均衡.....	9
图 9: BQ76PL455A-Q1 外部均衡框图.....	10
图 10A: 电压采样线束和均衡线束分开.....	11
图 10B: 电压采样线束和均衡线束使用同一线束.....	11
图 11: 电压采样线束和均衡线束使用同一线束时的寄生阻抗.....	12
图 12: 均衡停下来再去读取电芯电压的数据.....	12
图 13: BQ79616-Q1 外部均衡的仿真电路.....	13
图 14: Cell(n-1)通道上的均衡 MOSFET 异常的短时间的导通的波形.....	13
图 15: Test 4 的 MOSFET 的 Vgs 的波形.....	14

表

表 1: 不同 RC 网络的参数的测试结果.....	14
----------------------------	----

1, 概述

所谓被动均衡 (Passive Balancing)，就是在串联的某节电芯上并联一个旁路电阻，对该节电芯进行放电，以电阻发热的形式把能量耗散掉，从而实现均衡的目的。与被动均衡相对应的是主动均衡。主动均衡 (Active Balancing) 是通过储能元件 (如电容，电感，变压器等)，以某种形式 (如隔离 DC-DC 等) 把能量从一个电芯转移到另一个电芯，从而实现均衡的目的。理想情况下，假设转换效率是 100%，那主动均衡是不损耗能量的。

TI 支持多节串联电芯的 AFE 有 BQ769x0 系列 (包括 BQ76920, BQ76930 和 BQ76940)，BQ769x2 系列 (包括 BQ76942, BQ76952 等)，BQ76PL455A, BQ79616-Q1 等。它们被广泛应用到多串数锂电池包的监控和保护方案上。它们都集成了被动均衡功能。但它们实现被动均衡的方式又略有差异。下面将详细讨论。

2, BQ76940 和 BQ76952 的均衡

2.1, BQ76940 和 BQ76952 的内部均衡方式

BQ76940 系列和 BQ76952 系列本身都是支持内部均衡。之所以把它们放在一起讨论，是因为它们的一个共同点是电压测量和均衡共用相同的管脚，如图 1 所示。具体实现方式是在芯片内部通过 MOSFET 短接相邻的管脚，从而产生流经 R_{vc} , R_{cb} (芯片内部 MOSFET 的导通阻抗) 和 R_{vc} 的均衡电流。均衡电流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或容量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。

由于电压测量和均衡共用相同的管脚，也就是说电压测量和均衡共用相同的外部 RC。对电压测量来说，RC 是其起低通滤波作用，也对热插拔起到一定的防护作用。RC 越大，滤波和防护的作用就越好。对均衡来说，RC 中的 R 起着决定均衡电流大小的作用。R 越大，均衡电流越小。BQ76940 推荐的 R_{vc} 是 500~1000Ω。BQ76952 推荐的 R_{vc} 是 20~100Ω。

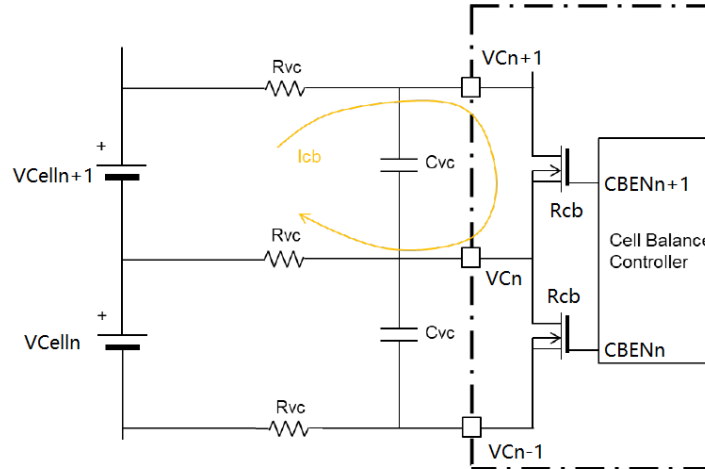


图 1: 内部均衡电路示意图

2.2, BQ76940 和 BQ76952 的外部均衡方式

基于 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）。如果需要更大的均衡电流，则只需要外部添加 MOSFET 和功率电阻，即可实现外部均衡。可以用 NMOS 做外部均衡开关，如图 2 所示。也可以用 PMOS 做外部均衡开关，如图 3 所示。

图 2 中，用 NMOS 做外部均衡开关。外部 NMOS 的栅极电压由 R_{vc} 和 $R_{cb}+R_{vc}$ 分压构成。当均衡使能信号 $CBEN_n$ 开通内部均衡开关时，在 NMOS 栅-源形成正压从而导通。均衡电流由外部均衡回路 I_{cbe} 和内部均衡回路 I_{cbi} 两路并联组成。

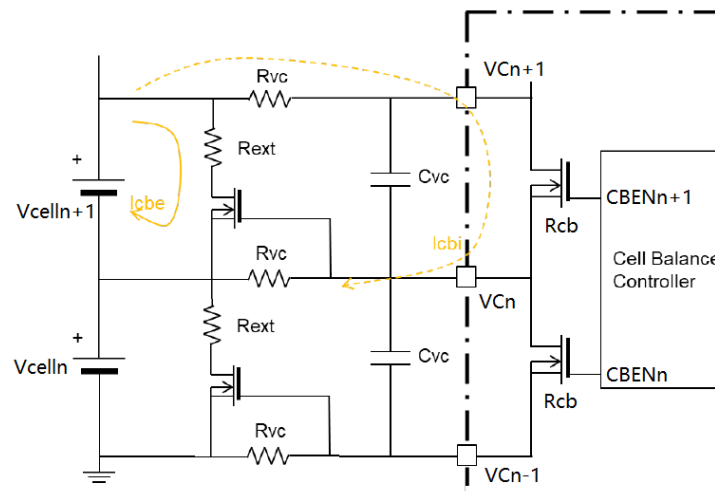


图 2: 用 NMOS 做外部均衡电路

图 3 中，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 $CBEN_n$ 开通内部均衡开关时，PMOS 栅-源形成负压从而导通。均衡电流由外部均衡回路 I_{cbe} 和内部均衡回路 I_{cbi} 两路并联组成。

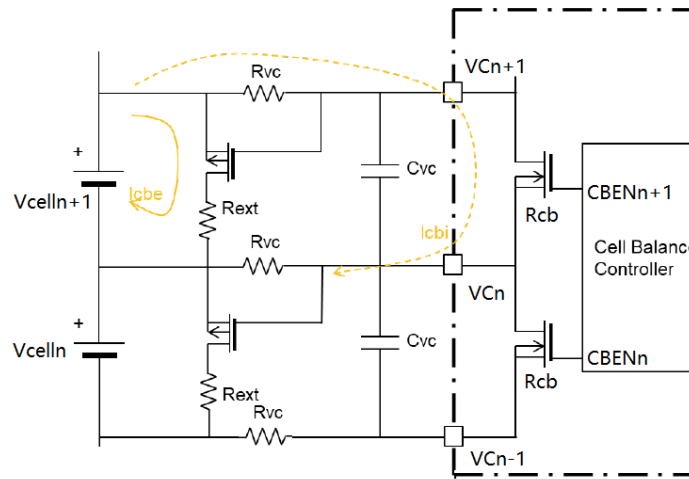


图 3: 用 PMOS 做外部均衡电路

2.3, BQ76940 和 BQ76952 的外部均衡的注意事项

2.3.1, 外部均衡 MOSFET 阈值的注意事项

从图 2 和图 3 可见，外部均衡 MOSFET 是靠芯片内部均衡 MOSFET 的导通，在 R_{vc} 、 R_{cb} 和 R_{vc} 产生均衡电流，从而在一个 R_{vc} 上产生压降来实现的。其压降为 $V_{cell} * R_{vc} / (R_{vc} + R_{cb} + R_{vc})$ 。

以 BQ76952 为例， $R_{vc}=100\Omega$ ， $R_{cb}=28\Omega$ ，在电芯电压超过 3.6V 时允许进行均衡，则在 R_{vc} 上的压降为 $3.6V * 100\Omega / (100\Omega + 28\Omega + 100\Omega) = 1.579V$ 。所以外部均衡 MOSFET 的选型时，需要考虑满足 $V_{GS(th)}$ 大于 1.579V。

2.3.2, 外部均衡 MOSFET 在电池包短路时的注意事项

在设计电池包保护板电路时，一定绕不过去的最极端的场景是短路，即电池包的 P+ 端和 P- 端被直接短接。这会瞬间产生几百安，甚至上千安的电流。短路保护电路需要在几十到几百微秒内把放电回路切断。在短路延迟期间，电芯电压可能被拉低至 0V。

在设计外部均衡电路时，也必须考虑短路的场景。如图 4 所示，在短路延迟期间，电芯侧的电压瞬间被拉低至 ~0V。但在芯片管脚侧，由于 RC 的存在，还维持着短路前的电压。这会在外部均衡 MOSFET 的 G 端和 S 端

产生高压。常用的 MOSFET 的 V_{GS} 的 Absolute Maximum Ratings 是 $\pm 20V$ ，所以这个瞬间的高压会导致外部均衡 MOSFET 损坏。所以需要加稳压管进行防护，如图 4 的 Dgate14 和 Rg14。

图 4 所示是使用 P-MOSFET 的情况，在使用 N-MOSFET 的情况，也是类似的，需要在 N-MOSFET 的 G 端和 S 端加稳压管进行防护。

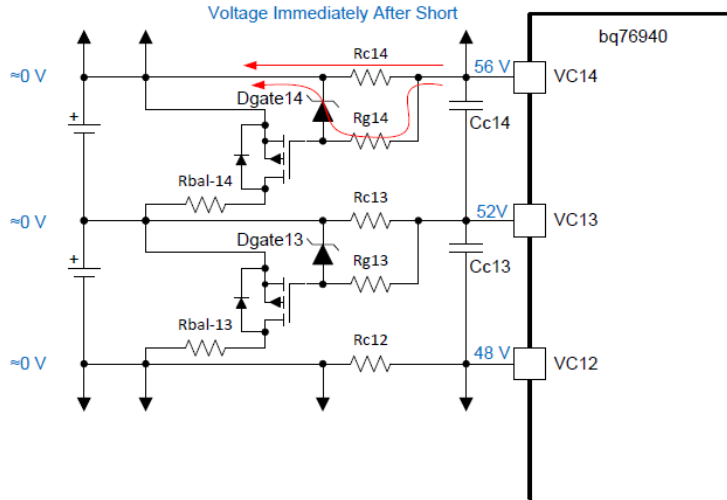


图 4：短路瞬间各节点的电压

2.3.3. 均衡 MOSFET 使用 P-MOSFET 在乱序上电时的注意事项

如果使用 P-MOSFET 作为均衡 MOSFET，那么在乱序上电的场景，可能会导致芯片管脚损坏。以图 5 为例，初始状态下 $Cc0 \sim Cc4$ 是没有电压的，当地线和第四节电芯正端的线先接上，电芯会通过 $Rc4$ ， $Rg4$ 和 $Dg4$ 对 $Cc4 \sim Cc0$ 进行充电。从而在 $Rc4$ 上形成压差，导致 $Q4$ 导通。 $A3$ 节点的电压上升，这样又会通过 $Rc3$ ， $Rg3$ 和 $Dg3$ 对 $Cc3 \sim Cc0$ 进行充电。从而在 $Rc3$ 上形成压差，导致 $Q3$ 导通。 $A2$ 节点的电压上升...这个过程会继续下去，直到 $A0$ 节点的电压上升。由于 BQ76940 的 $VC0$ 对地的最大耐压只有 $3.6V$ ，这可能导致 $VC0$ 管脚损坏。

如果使用 N-MOSFET 作为均衡 MOSFET，虽然在乱序上电的场景也存在类似的对电容充电的情况。但在 N-MOSFET 上 G 端和 S 端形成的是负压，不会让 N-MOSFET 导通。所以一般推荐使用 N-MOSFET 作为外部均衡的 MOSFET。

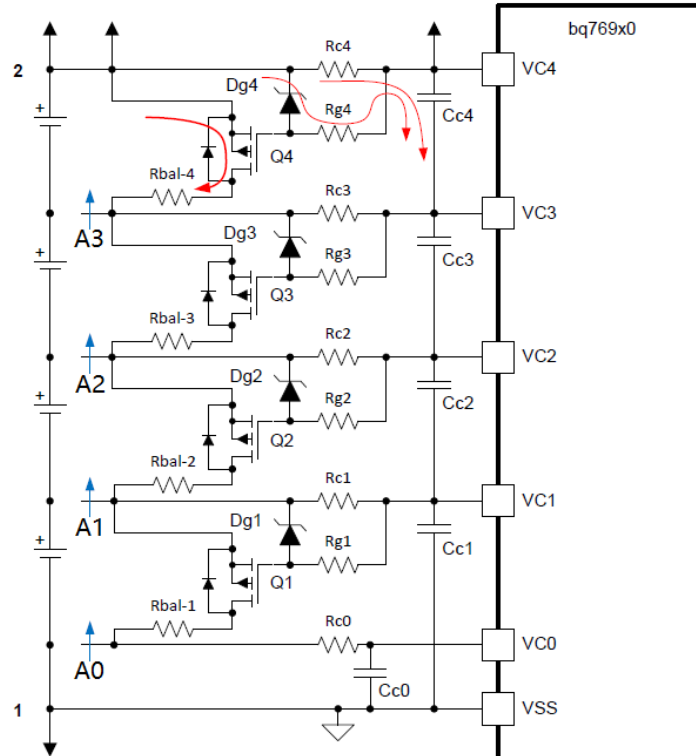


图 5: P-MOSFET 在乱序上电时的注意事项

2.4, BQ76940 被动均衡的注意事项

在相邻多节电芯同时均衡的问题上，BQ76940 需要特别注意，因为 BQ76940 的单通道差分耐压（即 $VC_n - VC_{n-1}$ ）最大值是 9V。如果相邻多个通道同时进行均衡，可能会出现超过最大差分耐压的情况，进而导致管脚损坏。

图 6 所示，BQ76940 相邻两个通道同时均衡的情况。以 15 串，每节电芯 4.2V 为例，同时均衡 Cell12 和 Cell13 的电压分布情况如图所示。在 VC13 和 VC14 管脚之间的压差已经达到 8.38V 了，其裕量已经不大。如果此时有干扰或者电芯电压有波动，可能会超过最大耐压 9V。

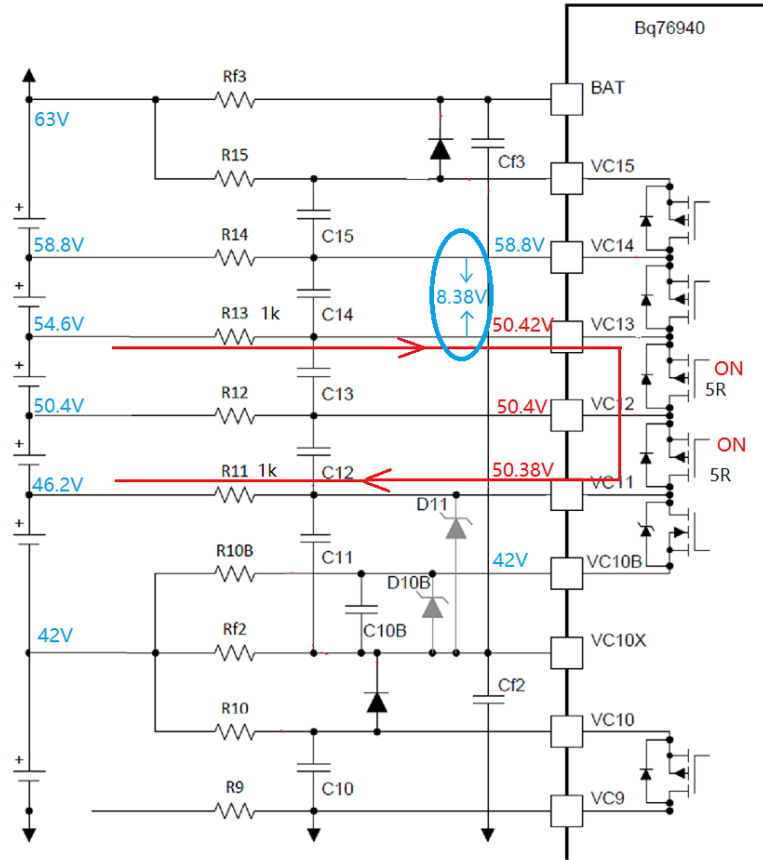


图 6: BQ76940 相邻两个通道同时均衡

图 7 所示，BQ76940 相邻三个通道同时均衡的情况。以 15 串，每节电芯 4.2V 为例，同时均衡 Cell12，Cell13 和 Cell14 的电压分布情况如图所示。此时 VC14 和 VC15 之间的压差已经达到 10.45V，超过最大耐压了。

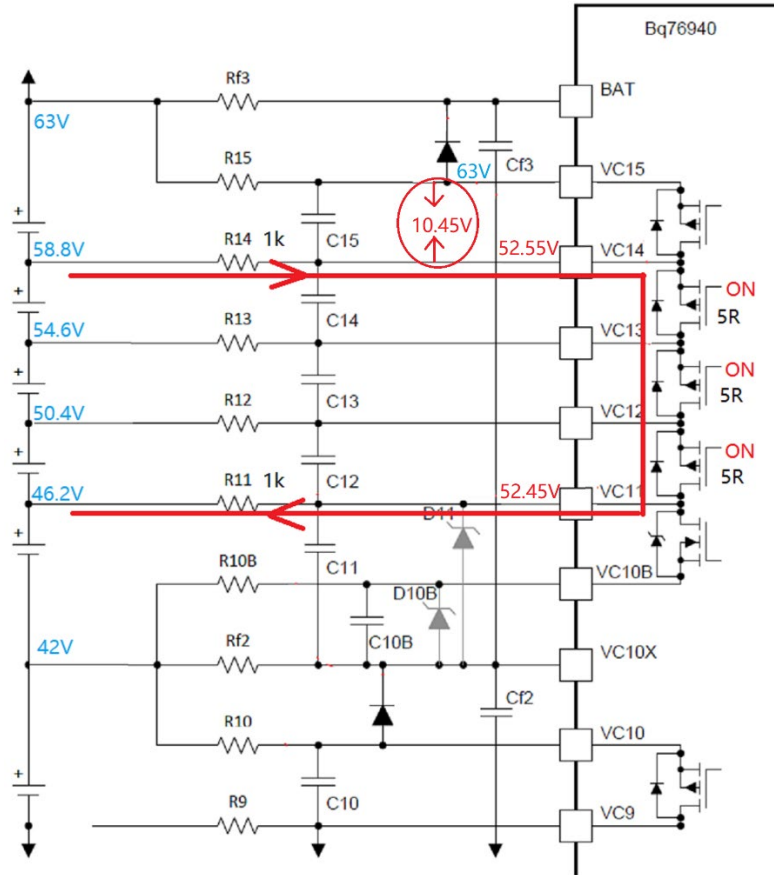


图 7: BQ76940 相邻三个通道同时均衡

图 8 所示是 BQ76940 隔一个通道的两个通道同时均衡的情况。以 15 串，每节电芯 4.2V 为例，Cell12 和 Cell14 同时均衡时的电压分布图。跟图 6 的情况类似，在 VC12 和 VC13 管脚之间的压差已经达到 8.39V 了，其裕量已经不大。如果此时有干扰或者电芯电压有波动，可能会超过最大耐压 9V。

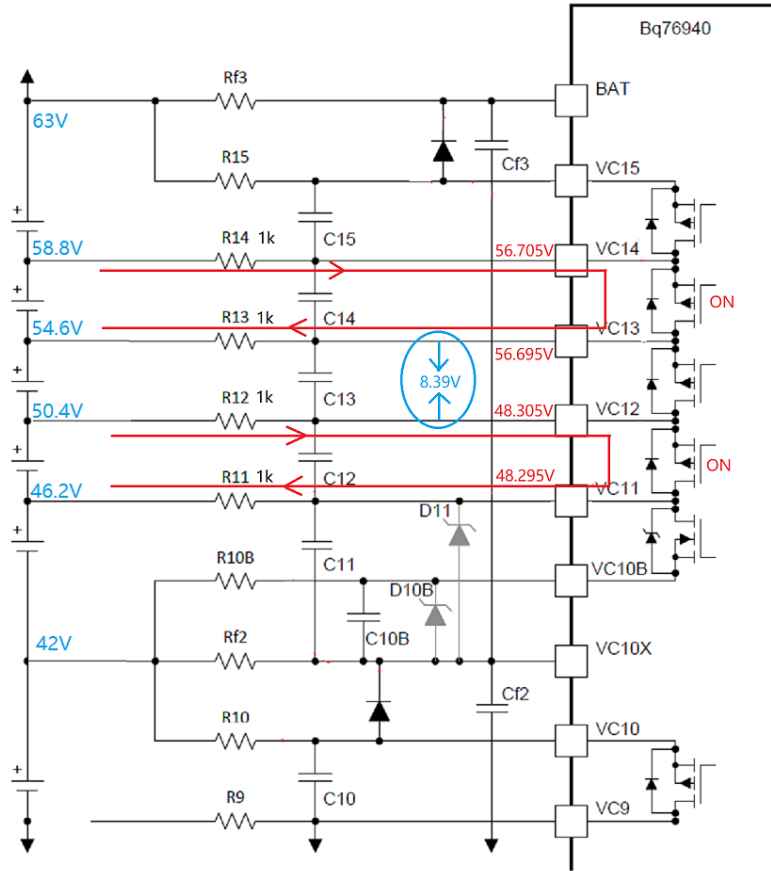


图 8: BQ76940 隔一个通道的两个通道同时均衡

综上所述，BQ76940 多通道同时均衡的建议是至少隔两个或两个以上通道的通道可同时均衡。

2.5, BQ76952 被动均衡的注意事项

BQ76952 支持 AFE 自动均衡模式 (autonomous balancing) 和主机 MCU 控制的均衡模式 (host-controlled balancing)。主机 MCU 控制的均衡可能出现这样一种情况：主机在使能了 AFE 的均衡后，主机出现异常（如 MCU 程序跑飞等）或者 I2C 通讯异常等，导致 BQ76952 一直没有收到停止均衡的指令。最终的结果是把某些电芯一直被放电至电压很低，导致整个电池包报废。为了防止这种情况，BQ76952 有以下停止均衡的机制：

- (1)，MCU 发送停止均衡的指令。
- (2)，基于定时器的停止均衡机制。主机使能均衡后，同时启动定时器。到了定时器设定的时间后，会自动停止均衡。
- (3)，基于芯片内部温度来停止均衡。因为均衡电流会流经芯片内部的 MOSFET，导致芯片发热。如果芯片内部温度超过设定的阈值，会自动停止均衡。
- (4)，对 AFE 自动均衡模式，还会有基于电压的停止均衡机制。即电芯电压低于设定值后，会自动停止均衡。

关于 BQ76952 的被动均衡，可参考应用笔记 Cell Balancing with BQ76952, BQ76942 Battery Monitors (<https://www.ti.com/lit/pdf/sluaa81>)，这里不多赘述。

BQ76952 的均衡，有一点涉及到原理图设计的地方需要特别注意。均衡 MOSFET 的驱动电流是从 VC16 管脚取电的，一个正在工作的均衡通道会消耗~35uA 的电流。例如，Cell1 和 Cell4 同时在均衡，会从 VC16 消耗 70uA 电流。如果 VC16 管脚的 RC 选用的是 100R，那会导致 $100R * 70uA = 7mV$ 的误差。

针对这个问题，有如下建议：

- (1)，VC16 管脚的 RC 的 R，规格书的推荐范围是 20R~100R。建议选用 20R。
- (2)，限制同时均衡的通道数。

3, BQ76PL455A-Q1 的均衡方式

BQ76PL455A-Q1 是车规级的 AFE，它跟 BQ76940, BQ76952 的均衡的不同之处是 BQ76PL455A-Q1 只支持外部均衡，而且它提供了专门驱动外部均衡 MOSFET 的驱动管脚 EQ1~EQ16，详见图 9。当内部 MOSFET Q4P 导通时，芯片内部会把 VSENSE4 接到 EQ4，以此来驱动外部 MOSFET Q4 导通来实现均衡。

所以在电路设计上，有一点需要注意的是当外部 MOSFET Q4 导通时，会存在如下图的电流。以电芯电压 =4.2V, R73=100k 为例，该电流大概是~40uA。这个电流在 R67 上会产生~4mV 的压降。如果在均衡的同时，进行电压测量，那会产生 4mV 误差。

针对这个问题，有如下建议：

- (1)，适当增大 R73，以减小在 R67 上的压降。
- (2)，在软件上进行控制。在均衡的时候，不对测量的电压进行判断和处理。停止均衡后，再对测量的电压进行判断和处理。

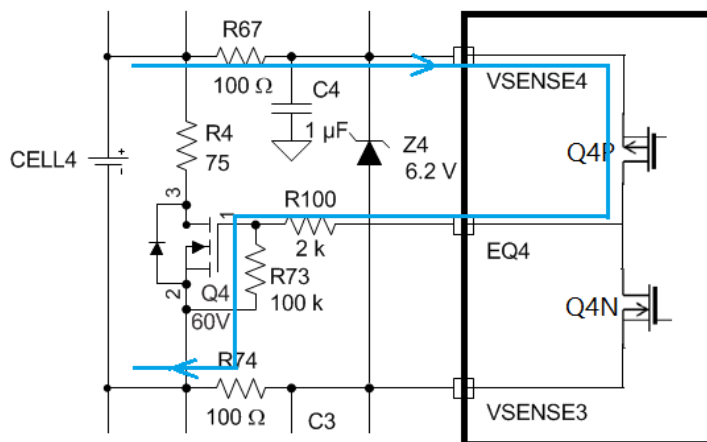


图 9: BQ76PL455A-Q1 外部均衡框图

BQ76PL455A-Q1 有以下停止均衡的机制：

- (1)，MCU 发送停止均衡的指令。

(2)，基于定时器的停止均衡机制。主机使能均衡后，同时启动定时器。到了定时器设定的时间后，会自动停止均衡。

4, BQ79616-Q1 的均衡方式

BQ79616-Q1 的电压测量和均衡上是分开不同的管脚的。电压测量是 VC0~VC16 管脚，均衡是 CB0~CB16 管脚，如图 10A 和图 10B 所示。BQ79616-Q1 可支持 8 个奇数通道同时均衡或者 8 个偶数通道的同时均衡，均衡电流可达 240mA。

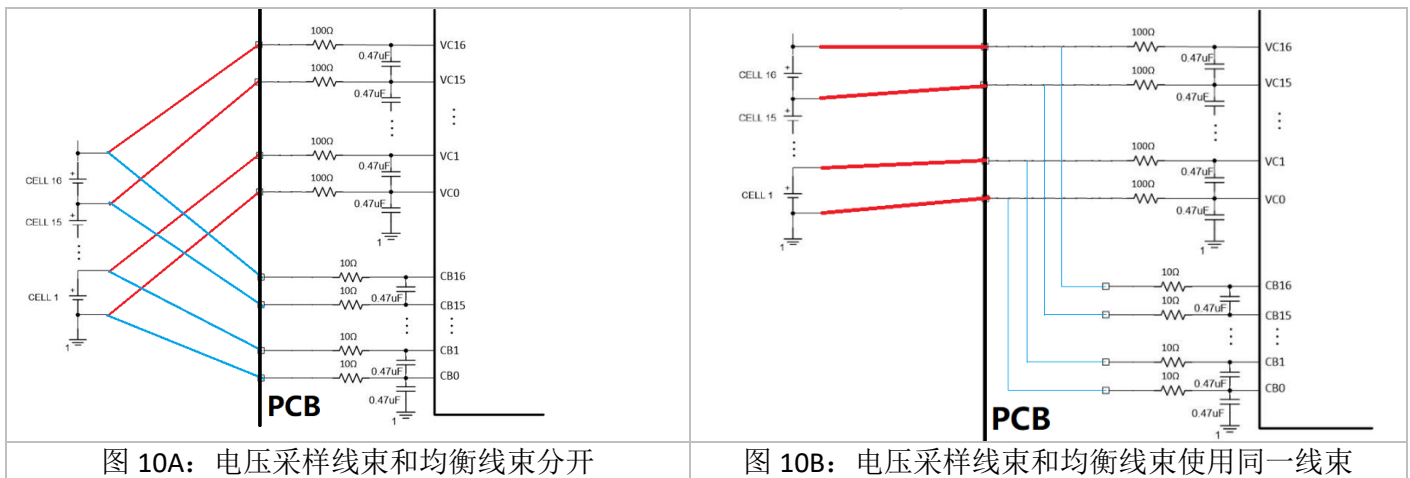
均衡管脚 CB0~CB16 也可以进行电压测量。BQ79616-Q1 集成了两个 ADC：主 ADC 和副 ADC。副 ADC 是通过管脚 CB0~CB16 来测量各节电芯的电压。这样可以实现主 ADC 和副 ADC 的交叉检查，以满足功能安全的需要。

BQ79616-Q1 有以下停止均衡的机制：

- (1)，MCU 发送停止均衡的指令。
- (2)，基于定时器的停止均衡机制。主机使能均衡后，同时启动定时器。到了定时器设定的时间后，会自动停止均衡。
- (3)，基于芯片内部温度和外部 NTC 温度来停止均衡。
- (4)，基于电压的停止均衡机制。即电芯电压低于设定值后，会自动停止均衡。

4.1, 线束对均衡时的电压精度的影响

BQ79616-Q1 通常被用于对电压测量精度要求很高的储能系统或电动汽车的 BMS 方案上。为了避免均衡对电压测量精度的影响，理想的情况是如图 10A 所示，电压采样线束和均衡线束分开。但出于成本的考虑，通常会使用如图 10B 所示的那样，电压采样线束和均衡线束使用同一线束。



对于电压采样线束和均衡线束使用同一线束的情况，如图 11 所示。其中 R 包括电芯极耳的阻抗，线材本身的阻抗，连接器的接触阻抗等。另外，基于安全性考虑和 EMC 的考虑，有些客户也会加保险丝 FUSE 和磁珠 L。

R, FUSE 和 L 的总寄生阻抗，可能会有几十到几百毫欧以上。如果在均衡的时候进行电压采样，会对电压精度产生影响。

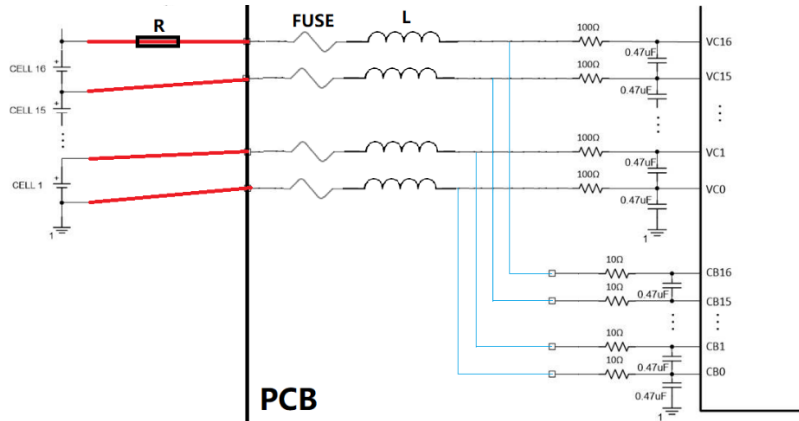


图 11: 电压采样线束和均衡线束使用同一线束时的寄生阻抗

以 R, FUSE 和 L 的总寄生阻抗等于 100 毫欧为例，如果在奇数通道都在均衡时进行电芯电压 ADC 采样，则奇数通道 ADC 值会比电芯真实值低 $2 * (240mA * 100mOhm) = 48mV$ ，偶数通道 ADC 值会比电芯真实值高 $2 * (240mA * 100mOhm) = 48mV$ 。其中 240mA 为 BQ79616-Q1 的可支持的最大均衡电流。

为了应对均衡对电压的影响，可以采用一下规避方案：

- (1)，在均衡的时候，虽然进行 ADC 采样，但主机不读取电芯电压的数据。或者主机读取电芯电压的数据，但不做处理或者判断。
- (2)，在需要进行电压采样时，把均衡停下来，等待一段时间，再去读取电芯电压的数据。读完电芯电压的数据后，再重新开始均衡。这期间，主 ADC 一直在进行 ADC 采样。如图 12 所示。

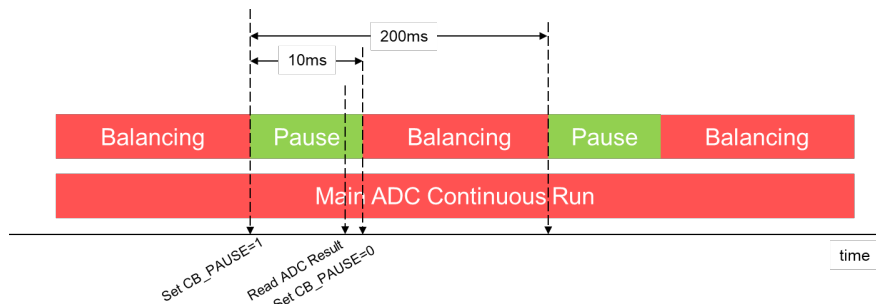


图 12: 均衡停下来再去读取电芯电压的数据

4.2, 外部均衡的 RC 的考虑

BQ79616-Q1 本身可以支持 240mA 的内部均衡电流。如果客户还想支持更大的均衡电流，可以通过外加功率电阻和 MOSFET 来实现，如图 13 所示。但在使用 BQ79616-Q1 外部均衡电路时，可能会遇到这样的问题：在对某节电芯 Cell(n)进行外部均衡时，相邻通道上的均衡 MOSFET 也会异常的短时间的导通。以 $R_{gate}=50$ ， $RCB=1k$ ， $CCB=470nF$ 为例，在对 Cell8 进行均衡时，在 Cell7 通道上的外部均衡 MOSFET 的 G 和 S 端看到的电压波形，如图 14 所示：峰值是 1.14V， $>800mV$ 的持续时间是 230uS。

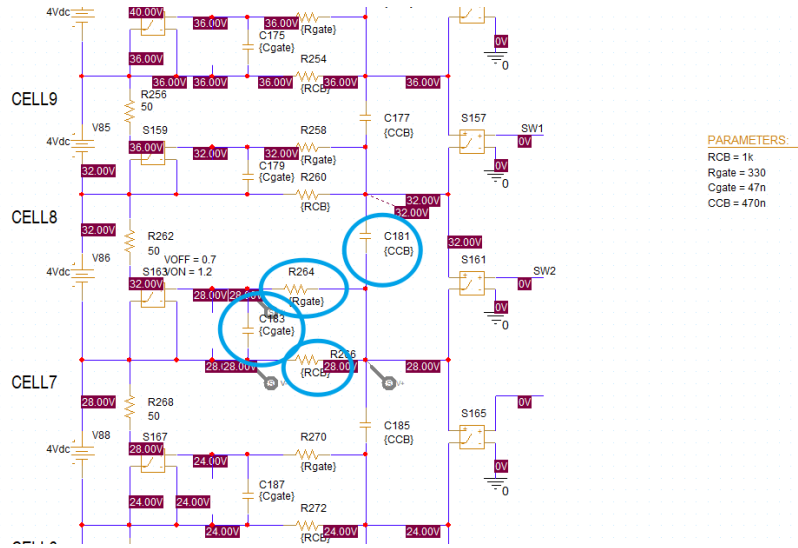


图 13: BQ79616-Q1 外部均衡的仿真电路

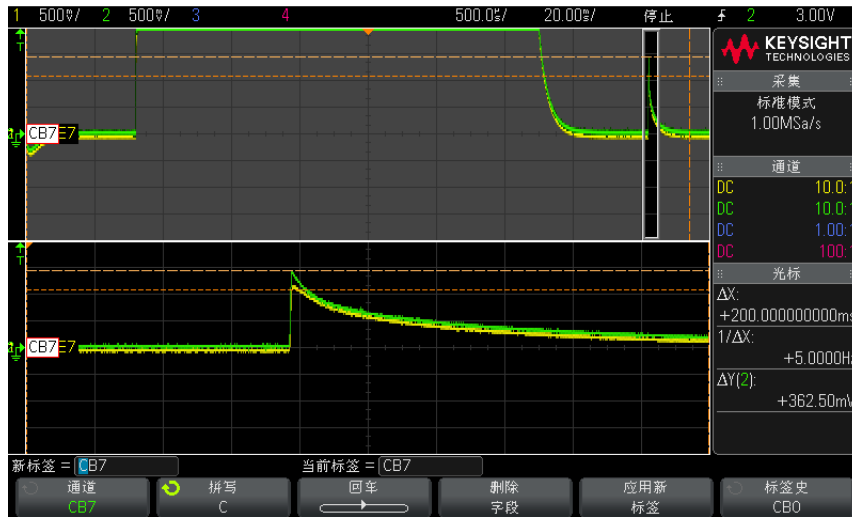


图 14: Cell(n-1)通道上的均衡 MOSFET 异常的短时间的导通的波形

这是因为在不进行均衡时， CB_n 管脚上的电压是稳定的， CB_n 管脚上的差分电容的压差也是稳定的，等于电芯电压，详见图 13。当对 Cell8 进行均衡时，芯片内部的均衡 MOSFET 快速对 $CB_7 \sim CB_8$ 上的差分电容 C181 进行放电，导致 $CB_7 \sim CB_8$ 上的电容的电压快速变成 0V。其他通道上的差分电容上的电压会通过 RC 网络进行重新分配，导致 CB_7 管脚上的电压升高，最终导致在 Cell7 通道上的外部均衡 MOSFET 短时间导通。

在 Cell7 通道上的外部均衡 MOSFET 的 G 和 S 端的电压峰值和持续时间跟跟外部的 RC 网络有关。实测结果参考表 1。Test 4 在外部均衡 MOSFET 的 G 和 S 端的电压峰值已经 $< 300\text{mV}$ ，可以保证该通道上的外部均衡 MOSFET 不导通。所以推荐 $R_{\text{gate}}=330\text{R}$ ， $R_{\text{CB}}=500\text{R}$ ， $C_{\text{CB}}=470\text{nF}$ 。

表 1: 不同 RC 网络的参数的测试结果

	Rgate	RCB	CCB	VCB7 overshoot	Vgate7 overshoot
Test1	50	1k	470nF	1.42V	1.14V >800mV, 230uS
Test2	330	1k	470nF	1.52V	1.06V >800mS, 200uS
Test3	330	510	470nF	1.41V	0.92V >800mV, 52us
Test4	330	510	47nF	620mV	300mV



图 15: Test 4 的 MOSFET 的 Vgs 的波形

5, 总结

本文介绍了内部均衡, 外部均衡, 被动均衡, 主动均衡的概念。然后详细介绍了 TI 主流的 AFE (BQ769x0, BQ769x2, BQ76PL455A, BQ79616-Q1 等) 的均衡功能及其相关注意事项。这可以帮助客户在使用相关 AFE 时, 在原理图设计阶段, 规避可能遇到的均衡相关的问题。

参考文献

TI 电量计应用指导, www.ti.com/cn/lit/ZHCAAF7

BQ769x0 Family Top 10 Design Considerations, <https://www.ti.com/lit/pdf/slua749>

Cell Balancing with BQ76952, BQ76942 Battery Monitors, <https://www.ti.com/lit/pdf/sluaa81>

BQ76PL455A-Q1 Design Recommendations (Rev. A), <https://www.ti.com/lit/pdf/slua791>

BQ79616-Q1, BQ75614-Q1, BQ79656-Q1 Evaluation Module User's Guide (Rev. B), <https://www.ti.com/lit/pdf/sluuc37>

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