

Application Note

使用 BQ7690x 电池监测器实现电芯平衡



Jose Couso

摘要

BQ7690x (包括 BQ76905 和 BQ76907) 是高精度、低功耗电池监测器和保护器系列, 具有主机操作的电芯平衡功能。本文档介绍了如何使用电芯平衡功能、如何使用外部电路 (FET 和 BJT) 增大平衡电流, 以及主机控制型平衡算法的系统注意事项。

内容

1 引言.....	2
2 电池平衡电路注意事项.....	2
2.1 内部电池平衡电路设计.....	2
2.2 采用 N 沟道 FET 的外部电池平衡电路设计.....	3
2.3 采用 BJT 的外部电池平衡电路设计.....	5
3 主机平衡算法注意事项.....	6
4 时序信息.....	8
5 调试电池平衡的常见问题.....	11
5.1 使用电阻分压器作为电池仿真器.....	11
5.2 电芯平衡故障排除.....	12
6 总结.....	13
7 参考资料.....	13

插图清单

图 2-1. 用于内部平衡的应用电路.....	2
图 2-2. 电芯 1 (VC1) 上的内部电芯平衡.....	3
图 2-3. 采用外部 N 沟道 FET 的平衡电路.....	4
图 2-4. 采用 N 沟道 FET 的 BQ76907 电芯平衡, 电芯 7 (VC7) Rbal_voltage 大约 = 3.86V.....	4
图 2-5. 采用外部 BJT 的平衡电路.....	5
图 2-6. 采用 NPN BJT 的 BQ76907 电芯平衡, 电芯 7 (VC7) Rbal_voltage 大约 = 3.68V.....	6
图 3-1. 相邻电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色, 电芯 2 (VC2) 蓝色.....	7
图 3-2. CB ACTIVE CELLS 寄存器.....	7
图 4-1. CB_LOOP_SLOW = 0x00 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色.....	8
图 4-2. CB_LOOP_SLOW = 0x01 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色.....	9
图 4-3. CB_LOOP_SLOW = 0x10 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色.....	9
图 4-4. CB_LOOP_SLOW = 0x11 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色.....	10
图 4-5. CB_LOOP_SLOW = 0x00 且 Settings:Cell Balancing:Balancing Configuration[CBDL2:0] = 0x07 (64ms 延迟) 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色, 电芯 3 (VC3) 蓝色.....	11

表格清单

表 3-1. 主机控制型电芯平衡子命令.....	6
表 4-1. 电池平衡循环减慢设置.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在电池包制造期间，电池电芯通常是相配的。随着时间的推移，电池之间的荷电状态可能会出现不平衡，从而降低电池组的整体容量。具有电芯平衡功能的电池监控器可以延长电池包的电池寿命。

BQ7690x 使用集成旁路开关或外部旁路开关在充电或静置期间旁路所选电芯的电流，从而支持被动电芯平衡。对于外部旁路开关，用户可以选择 FET 或 BJT 晶体管。均衡必须从主机处理器中手动启动和控制。

当平衡处于活动状态时，将有电流流入电芯输入引脚。为了准确测量，在测量各个电芯时，需要暂时禁用电芯平衡功能。因此，在平衡期间修改了器件测量电芯电压和评估电芯电压保护的时序。当电芯上的电芯平衡处于活动状态时，在每次 ADscan 期间测量电芯电压和共享时隙时，暂时禁用内部平衡 FET。

2 电池平衡电路注意事项

特定电池的电池平衡包括启用该电池上的集成式 FET 开关。在启用内部平衡功能时，平衡电流由所选输入滤波电阻器的值决定。在内部平衡电流可能不足的应用中，可以通过使用场效应晶体管 (FET) 或双极结型晶体管 (BJT) 来增大平衡电流。

本节讨论了内部平衡、使用 N 沟道 FET 的外部平衡和使用 BJT 的外部平衡。此外，还讨论了功率耗散和时序注意事项。

2.1 内部电池平衡电路设计

在启用其中一个内部平衡 FET 后，此内部 FET 会同时拉该电池的引脚，从而使电流流经该电池的输入电阻器。在使用内部平衡功能时，输入滤波电阻器的最小建议值为 $20\ \Omega$ 。该值可以最大限度地提高平衡电流，同时使其不超出内部 FET $R_{DS(ON)}$ 范围内的绝对最大电池平衡电流。输入滤波电阻器的最大建议值为 $1\text{k}\ \Omega$ 。

内部 FET 的典型内部电芯平衡电阻 ($R_{DS(ON)}$) 为 $80\ \Omega$ 。对于完全充电电压为 4.2V 的典型锂离子电池，这会产生大约 35mA 的平衡电流。如果开关持续接通，那么该电流为直流电流，因此平均平衡电流会更低。占空比由多种因素决定，节 4 将对这些因素进行更加详细的讨论。

$$I_{Balance} = \frac{V_{CELL}}{(2 \times R_n + R_{CB})} = \frac{4.2}{(2 \times 20 + 80)} = 35\text{mA} \quad (1)$$

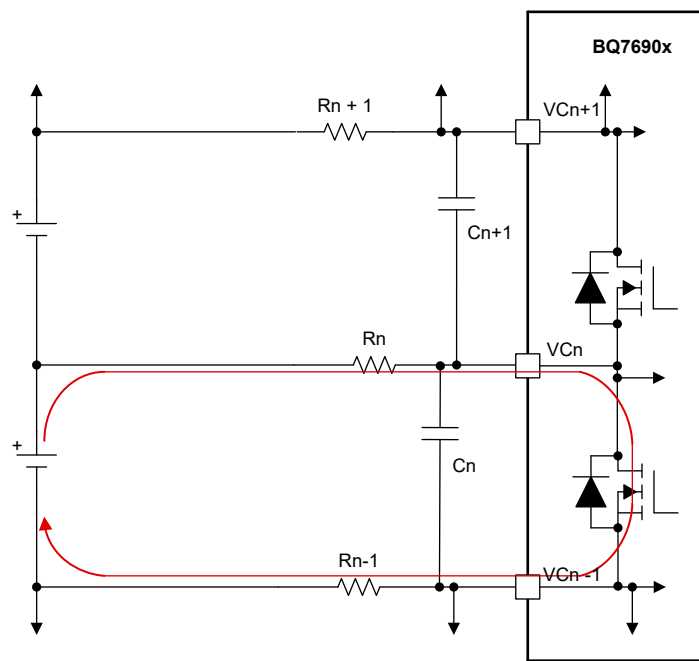


图 2-1. 用于内部平衡的应用电路

对于许多应用来说，器件的内部平衡电流足以满足要求，不需要额外的外部元件。不过，必须考虑功率耗散及其对器件温度的影响。例如，35mA 电流流过 80 Ω 电阻器会产生约 0.098W 功耗（几乎为 100mW）。器件的结至环境热阻 (θ_{JA}) 为 47.2°C/W。如果同时对 5 节电芯进行平衡，则会导致结温上升约 23°C。

可以通过不同的备份方法来避免过大的功率耗散。主机可以限制允许同时平衡的电芯的最大数量，请参阅[如何限制最大平衡电芯数](#)。另一种替代方法是增大电芯输入电阻器，从而降低平衡电流并改善功率耗散。

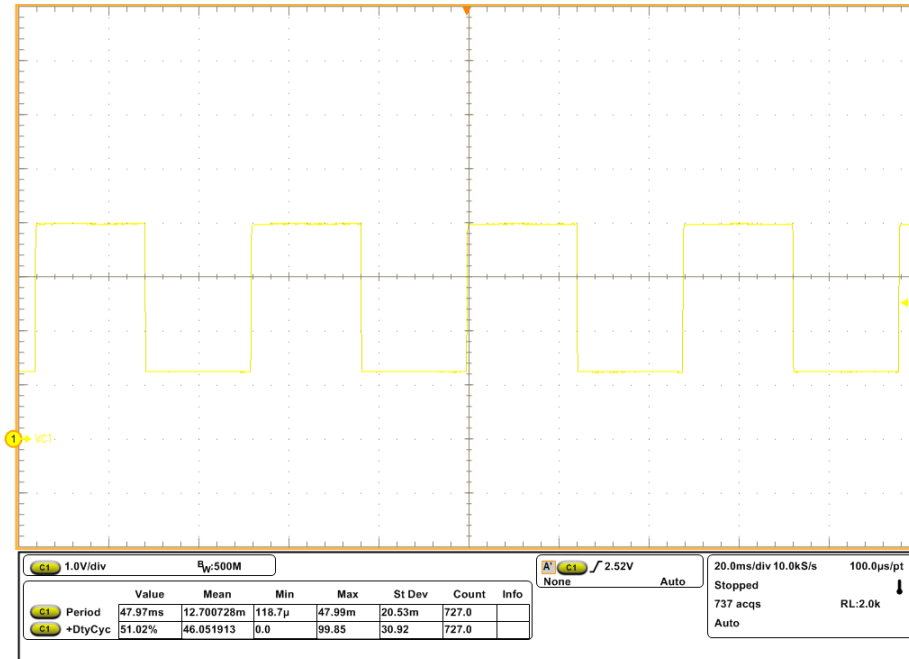


图 2-2. 电芯 1 (VC1) 上的内部电芯平衡

备注

在图 2-2 中，占空比的开通时间表示有效测量时间。而下部周期表示电芯平衡时间。

2.2 采用 N 沟道 FET 的外部电池平衡电路设计

对于需要更高电池平衡电流的应用，通常使用外部 FET。使用外部 FET 时，可以将电芯输入电阻器增大至最大建议值 1k Ω。增加电阻器大小将有助于在 FET 的栅极上提供足够的电压。在图 2-3 中，当内部 FET 在器件内部导通时，流经 R_{n-1} 的电流为外部 FET 提供 V_{GS} 的电压。

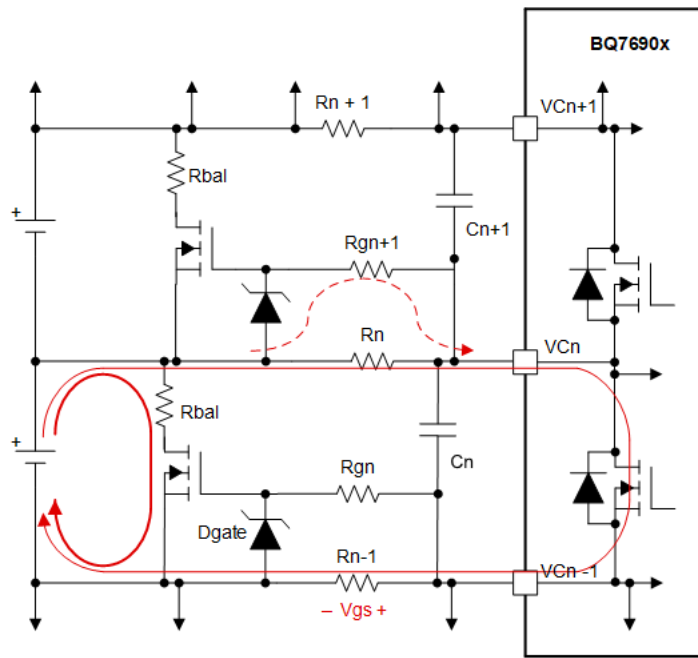


图 2-3. 采用外部 N 沟道 FET 的平衡电路

必须小心选择具有在低 V_{GS} 下定义的低 $R_{DS(on)}$ 的外部 FET。例如，假设最小电芯平衡电压为 3.9V。外部 FET 可以具有在 $3.9V \times 100 / (100 + 100 + 80) = 1.39V$ 或更低的电压下定义的 $R_{DS(on)}$ 。

需要使用一个齐纳二极管来保护外部 FET 栅极免受电池组瞬态的影响。例如，如果一个 7 节电池组发生短路，则在发生短路期间，电池 7 的 R_n 两端将具有大约 28V 的电压，而在短路解除时会发生相反的瞬态。可以通过一个电阻器来连接栅极电压，从而限制二极管导通时的电流。（在正常操作期间，齐纳二极管将不会导通）。

对于图 2-3，电路设计采用了 100Ω 的 R_n 和 $1k\Omega$ 的 R_{gn} 。 R_{bal} 电阻器设置为 50Ω ，从而在 4V 电压下使流经外部 FET 的平衡电流为约 77mA。在该电芯电压下，约 15mA 的额外电流流经器件的内部 FET，从而使总平衡电流接近 92mA。选择了一个具有为低 V_{GS} （低至 1.4V）定义的 $R_{DS(on)}$ 的 N 沟道 MOSFET。

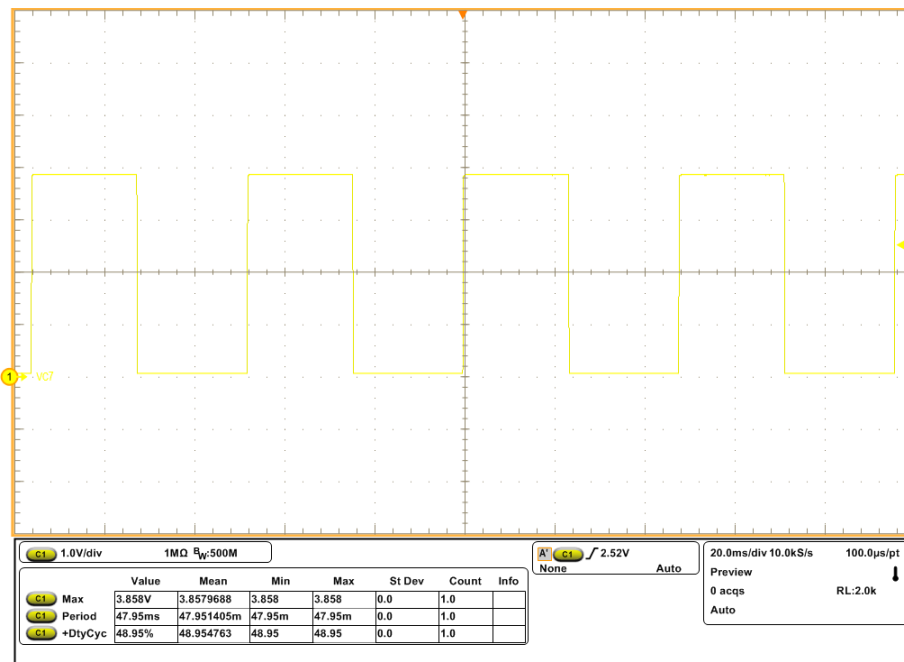


图 2-4. 采用 N 沟道 FET 的 BQ76907 电芯平衡，电芯 7 (VC7) Rbal_voltage 大约 = 3.86V

备注

在图 2-4 中，占空比的开通时间表示对电芯 7 (VC7) 进行平衡时，R_{bal} 电阻器两端的电压。而下部周期表示平衡功能关闭时 R_{bal} 电阻器两端的电压。

2.3 采用 BJT 的外部电池平衡电路设计

外部 FET 适用于大多数采用典型 4.2V 锂离子电芯的应用，因为在充电期间通常会在较高的电压下进行平衡。对于所需的平衡电流比内部平衡所能提供的平衡电流更高、但还需要在较低的电池电压下进行平衡的应用，可以考虑采用外部 BJT。可以通过选择合适的平衡电阻器 (R_{bal}) 和基极电阻器 (R_{bn}) 来控制外部 BJT 的平衡电流。在图 2-5 中，当内部 FET 在器件内部导通时，流经 R_{bn} 的电流使 NPN 晶体管进入饱和状态。

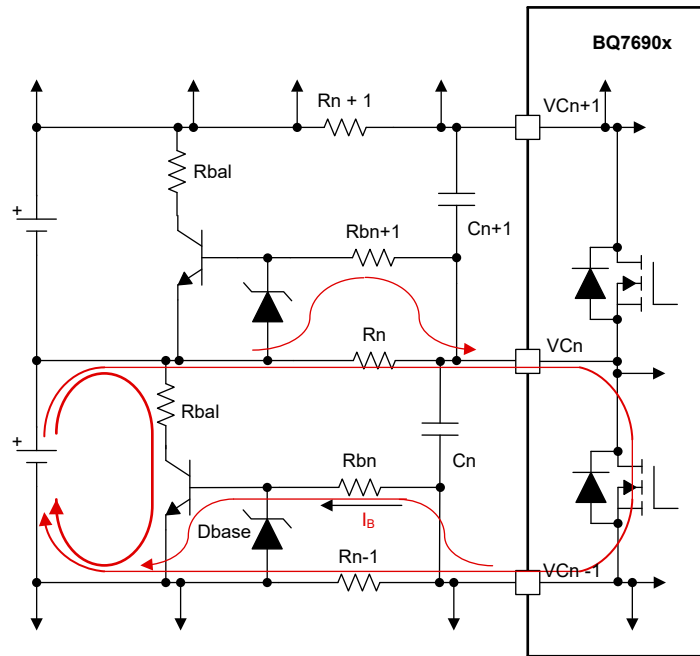


图 2-5. 采用外部 BJT 的平衡电路

该电路中还使用了一个齐纳二极管，以防受到与 FET 电路类似的电池组瞬态的影响。使用 BJT 时，也适合使用标准二极管，而不是齐纳二极管，因为保护晶体管的是齐纳二极管的正向电压。基极-发射极二极管 (或用于 PNP 的发射极-基极二极管) 将执行反向导通，这将阻止齐纳二极管导通。

备注

由于 BJT 附带了内置二极管，因此可能不需要齐纳二极管。

在图 2-6 中，电路设计采用了 100 Ω 的 R_n 和 240 Ω 的 R_{gn}。R_{bal} 电阻器设置为 50 Ω，从而在 4V 电压下使流经 BJT 的平衡电流为约 74mA。在该电芯电压下，约 15mA 的额外电流流经器件的内部 FET，从而使总平衡电流接近 89mA。选择了一个在 100mA I_C 下 hFE 为 30 的 NPN 晶体管。

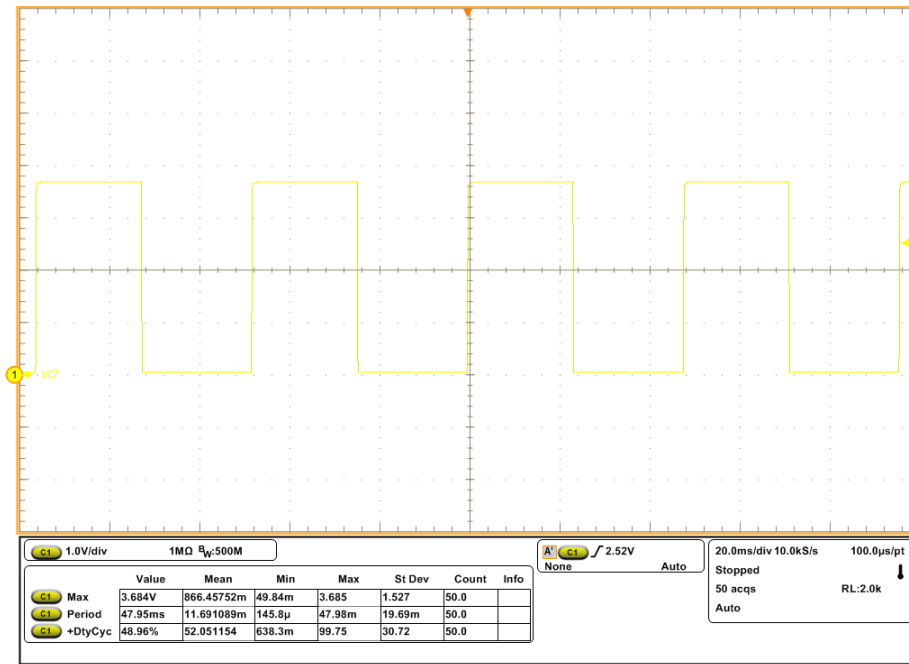


图 2-6. 采用 NPN BJT 的 BQ76907 电芯平衡，电芯 7 (VC7) Rbal_voltage 大约 = 3.68V

备注

在图 2-6 中，正占空比表示对电芯 7 (VC7) 进行平衡时，Rbal 电阻器两端的电压。而负占空比表示平衡功能关闭时 Rbal 电阻器两端的电压。

3 主机平衡算法注意事项

小心

如果电芯平衡控制位设置不当，则会损坏 IC。

对于主机控制型平衡，可以使用主机发送的特定子命令来实现控制，也可以在密封模式下访问这些子命令，这样就无需在操作中通过解封电池组来启动平衡。如果不进行主机控制型平衡，则可以通过设置 **Balancing Configuration[CB_NO_CMD]** 配置位来禁用对这些子命令的访问。表 3-1 中说明了主机用于控制电芯平衡的子命令。

表 3-1. 主机控制型电芯平衡子命令

子命令	说明
0x0083 CB_ACTIVE_CELLS()	执行读取操作后，报告位掩码，其中显示了哪些电池处于主动平衡状态。写入时，开始对指定的电芯进行平衡。写入 0x00 来关闭平衡功能。

备注

写入主机控制型平衡命令时，必须向寄存器 0x60/0x61 中写入校验和及长度，这样才能成功写入值。请参阅 [BQ76907 技术参考手册](#) 或 [BQ7690x 软件开发指南](#)，获取有关写入校验和及长度的信息。

相邻和非相邻电芯都可以进行平衡。使用主机发送的 **0x0083 CB_ACTIVE_CELLS()** 子命令来控制平衡。使用这个子命令启动平衡时，器件会启动一个计时器，并开始对指定的电芯进行平衡，持续时间最长达 20 秒。如果发出新的均衡子命令，计时器将复位。这是一种预防措施，以防主机处理器启动了平衡但随后又停止与 BQ7690x 通信，这样平衡就无法无限期地继续。主机可以将 0x00 写入子命令来禁用平衡。读取这个子命令时，该子命令会报告位掩码，用于显示对哪些电芯进行主动平衡。

如果热敏电阻（如果 TS 引脚配置为进行热敏电阻测量）的 ADC 测量值高于 **Settings:Cell Balancing:Min Temp Threshold**（最低温度的阈值）或低于 **Settings:Cell Balancing:Max Temp Threshold**（最高温度的阈

值)，或者器件的内部裸片温度超过 **Settings:Cell Balancing:Max Internal Temp** 设置的可编程阈值，那么器件将禁用平衡。

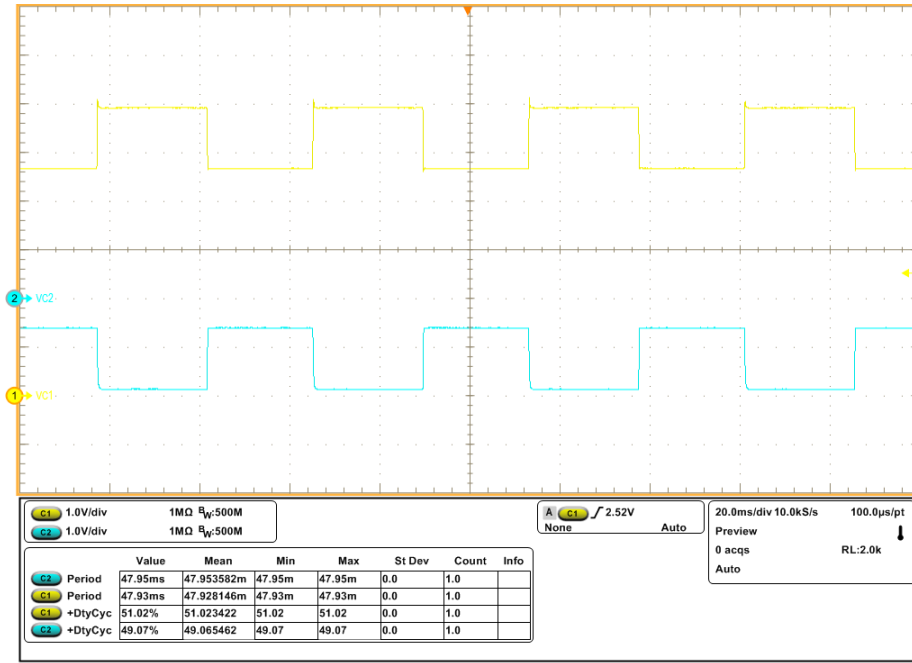


图 3-1. 相邻电芯平衡，电芯 1 (VC1) 黄色，电芯 2 (VC2) 蓝色。

备注

有关相邻电池平衡的说明：进行主机控制型平衡时需要注意确保功率耗散处于安全水平。仅在特殊情况下并经过仔细考虑后才可以进行相邻电芯平衡。必须注意不要超过 50mA (绝对最大值) 的电池平衡电流限值或 VC0 (绝对最大值) 的输入电压限值。

如何限制最大平衡电芯数

为了避免在电芯平衡时产生过多的功率耗散，主机可以限制允许同时平衡的电芯的最大数量。为了实现这一点，主机需要通过写入 CB ACTIVE CELLS 寄存器来指定允许进行平衡的电芯。

CB ACTIVE CELLS Register Field Descriptions

Bit	Field	Description
7-0	CBCELLS_7-CBCELLS_0	Cell balancing active cells: When read, reports a bit mask of which cells are being actively balanced. When written, starts balancing on the specified cells. Write 0x00 to turn balancing off. Bit 7 corresponds to the seventh active cell Bit 6 corresponds to the sixth active cell Bit 5 corresponds to the fifth active cell Bit 4 corresponds to the fourth active cell Bit 3 corresponds to the third active cell Bit 2 corresponds to the second active cell Bit 1 corresponds to the first active cell (will be connected between VC1 and VC0) Bit 0 is reserved, read/write 0 to this bit

图 3-2. CB ACTIVE CELLS 寄存器

例如，您可以执行以下序列，允许电芯 5 和电芯 7 进行平衡。

1. 写入 `0x0083 CB_ACTIVE_CELLS()`，后跟指定的电芯。
 - a. `W:10 3E 83 00 A0`

2. 写入校验和及长度。
 - a. W:10 60 DC 05
3. (可选) 在写入后读取, 确保指定的电芯处于平衡状态。
 - a. R:10 40 2

备注

BQ7690x 软件开发指南中介绍了如何写入 RAM 寄存器。

4 时序信息

由于平衡处于活动状态时电流流入 BQ7690x 上的电芯输入引脚, 因此如果不暂时禁用平衡, 则无法进行电芯电压测量。因此, 在平衡期间修改了器件测量电芯电压和评估电芯电压保护的时序。当任何电芯的平衡处于活动状态时, 在每次 ADSCAN 期间测量电芯电压以及在共享时隙测量期间, 暂时禁用平衡 FET。为了满足在电芯平衡期间进行常规测量的需求, **Settings:Configuration:Power Config[CB_LOOP_SLOW[1:0]]** 配置位会在电芯平衡处于活动状态时修改电芯电压测量时序, 从而增加平均平衡电流。这种修改涉及用相同宽度的空闲时隙替换所选 ADSCAN 中的测量值, 从而使平衡在更长时间内保持有效。

表 4-1. 电池平衡循环减慢设置

CB_LOOP_SLOW_1	CB_LOOP_SLOW_0	说明
0	0	在每两个 ADSCAN 中的一个会跳过测量。
0	1	每四个 ADSCAN 中的三个跳过测量。
1	0	每八个 ADSCAN 中的七个跳过测量。
1	1	每 16 个 ADSCAN 中的 15 个跳过测量。

备注

LOOP_SLOW 和 CB_LOOP_SLOW 设置独立运行。LOOP_SLOW 设置决定平衡未处于活动状态时常规测量循环的速度。CB_LOOP_SLOW 设置仅在平衡处于活动状态时确定常规测量循环的速度 (平衡期间这两个设置不会组合在一起)。

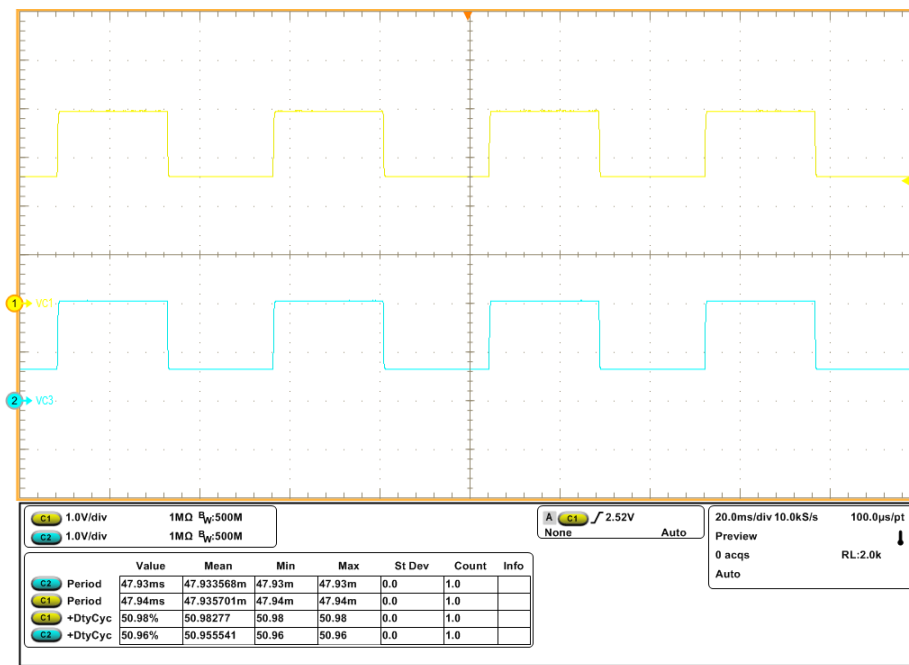


图 4-1. CB_LOOP_SLOW = 0x00 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色

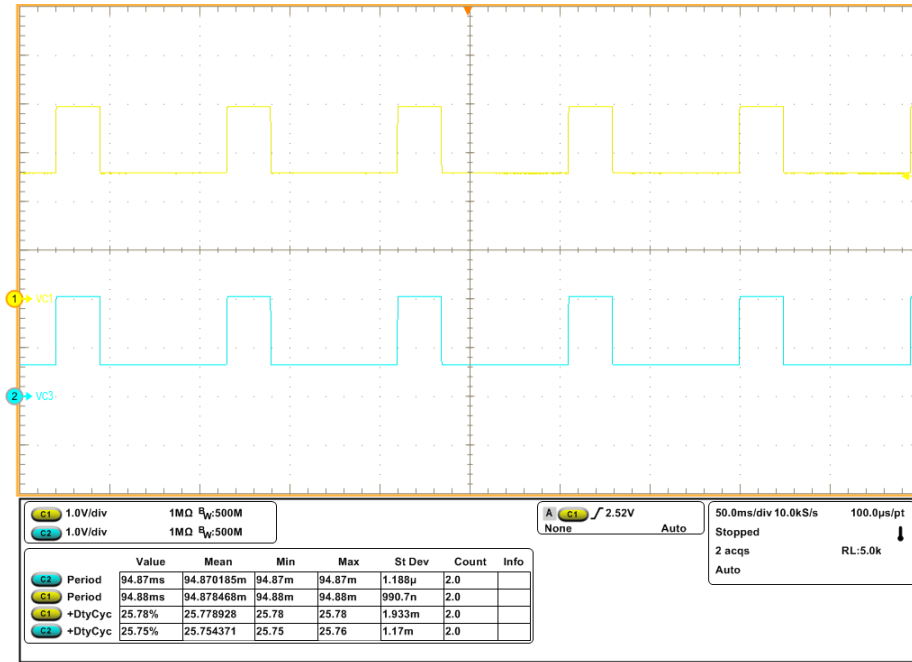


图 4-2. CB_LOOP_SLOW = 0x01 时的内部电芯平衡，电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色

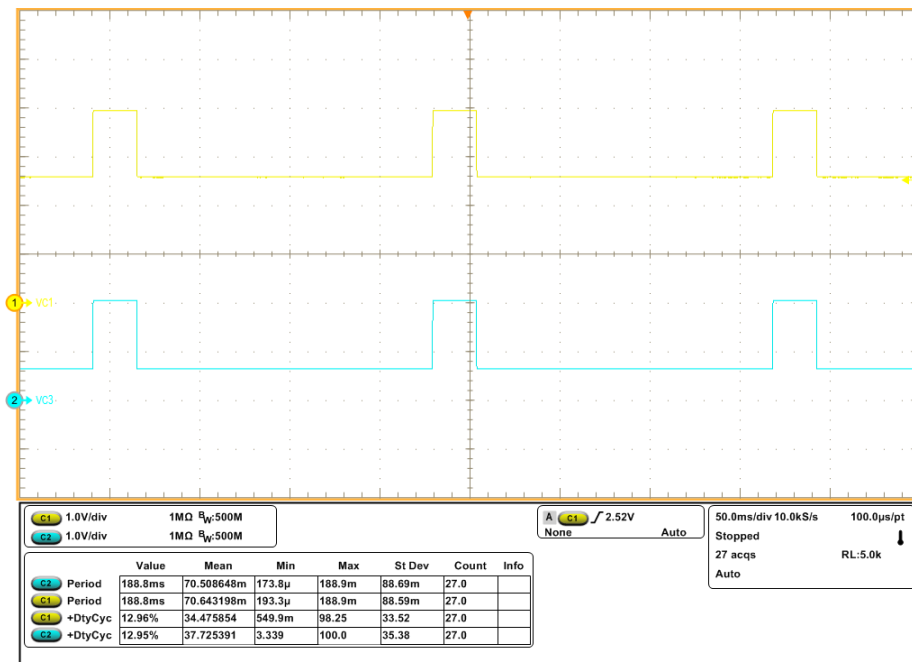


图 4-3. CB_LOOP_SLOW = 0x10 时的内部电芯平衡，电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色

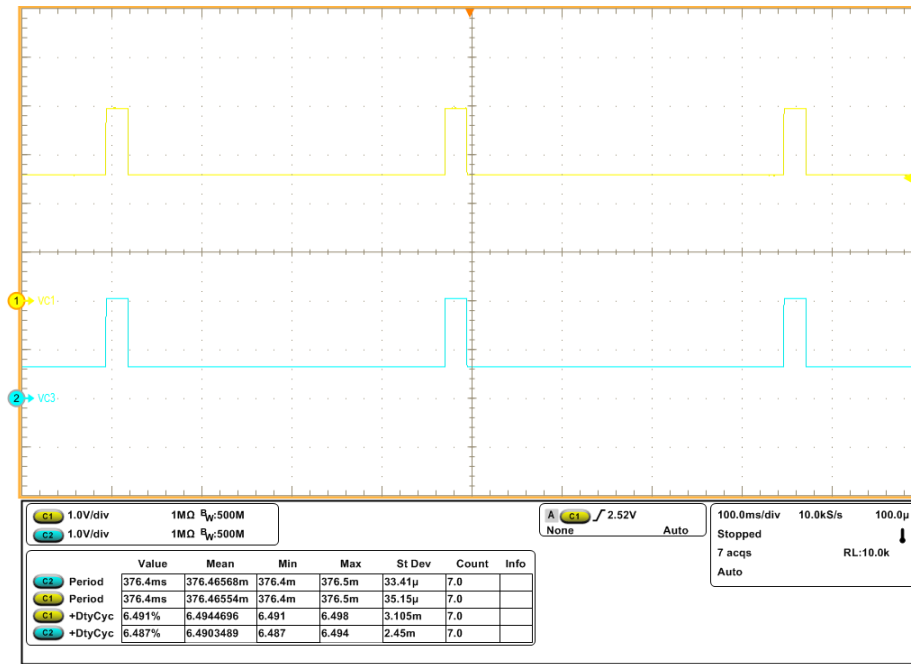


图 4-4. CB_LOOP_SLOW = 0x11 时的内部电芯平衡，电芯 1 (VC1) 黄色、电芯 3 (VC3) 蓝色

备注

在前面的四个图中，正占空比表示有效测量时间。负占空比表示电芯平衡时间。

在禁用电芯平衡时（无论是无限期还是定期禁用以允许进行常规电芯电压测量），由于电芯输入引脚处存在电阻器和电容器网络，可能会生成电压瞬态，从而影响附近几个电芯的输入引脚。如果在禁用电芯平衡后太快进行电芯测量，则电芯电压测量的准确性会受到影响。为了解决这一潜在问题，该器件包括一个可编程延迟，每次在禁用电芯平衡后进行任何电芯电压测量之前实施该延迟。通过 **Settings:Cell Balancing:Balancing Configuration[CB DLY2:0]** 将此延迟设置为零至 64ms。应该注意的是，这个延迟会增加连续有效测量循环之间的时间。

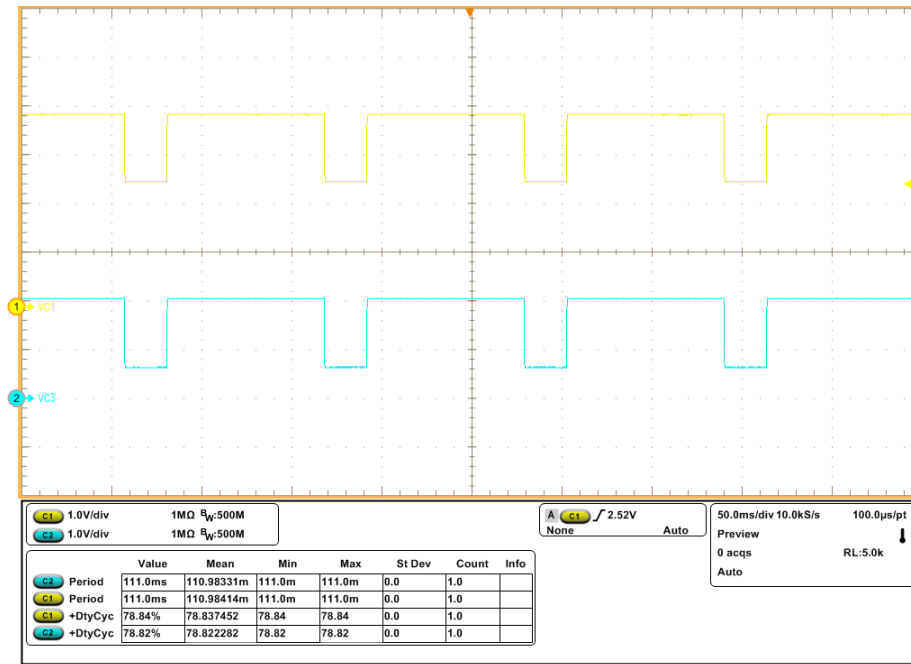


图 4-5. CB_LOOP_SLOW = 0x00 且 Settings:Cell Balancing:Balancing Configuration[CBDL2:0] = 0x07 (64ms 延迟) 时的内部电芯平衡, 电芯 1 (VC1) 黄色, 电芯 3 (VC3) 蓝色

备注

请注意, 以图 4-1 为基准时, 有效测量时间增加了约 64ms。这样用户就可以读取非常准确的电压测量值。

5 调试电池平衡的常见问题

5.1 使用电阻分压器作为电池仿真器

使用电源和电阻分压器测试电池平衡功能来模拟电池时, 这通常会触发过压保护, 这一情况也可在 **Safety Alert A** 寄存器中观察到。这是因为, 当其中一个电池上的电池平衡开启时, 电阻分压器会拉高其他电池输入的电压。这会导致电池变得不稳定, 从而触发过压状况。只要发生过压状况, 电池平衡功能就会立即禁用。

测试电池平衡功能的理想方式是使用真正的电池。如果没有真正的电池, 另一种选择是使用电阻分压器并在其中一个电池上连接另一个电源。例如, 如果主电源和电阻分压器设置为在每个电池输入上提供 3.9V 电压, 另一个电源可以设置为提供 3.9V 电压并连接到其中一个电池输入上。

5.2 电芯平衡故障排除

1. 为什么电芯平衡在几秒后停止？

20 秒后平衡会自动停止。用户负责重新发送 0x0083 命令。

2. 在 BQStudio 中使用 “Command Sequence” 选项卡时，为什么需要多次发送 Cell Balancing 命令？

确保 **Auto Refresh** 和 **Scan** 图标处于关闭状态，以便在进行平衡时 EV2400 不会一直与器件通信。

3. 为什么在进行平衡时我的万用表报告更低的平衡电流和更低的电压？

因为万用表无法跟上测量频率，所以万用表报告平均值。必须使用示波器来捕获这些测量值。

4. 为什么发送 0x0083 子命令后电芯平衡无法正常工作？

必须发送校验和与长度。请参阅以下示例。

电芯 1 (VC1) 电芯平衡命令

- W: 10 3E 83 00 02 (写入电芯 1)
- W: 10 60 7A 05 (校验和与长度)
- R : 10 40 2 (读取活动平衡电芯)

5. 我可以在哪里探查才能看到特定电芯上发生的电芯平衡情况？

如果使用内部平衡，可以在 VCx 引脚处探查。如果使用外部平衡电路，建议在外平衡电阻器处进行探测，以便查看 FET 或 BJT 是否导通。

6. 如何通过内部平衡 FET 来计算允许的最大耗散功率？

$$P = (I_{\max})^2 \times R_{DS(ON)}$$

其中 I_{\max} 是每节电芯的最大电芯平衡电流 (50mA)

其中内部 FET 的典型内部电芯平衡电阻 (内部 FET 的 $R_{DS(ON)}$) 为 80Ω

6 总结

BQ7690x (包括 BQ76905 和 BQ76907) 包括一个主机操作的电芯平衡功能, 可延长多节电池包的电池寿命。应用需要确定在系统设计中采用电芯平衡的理想替代方案。本文档介绍了电芯平衡功能如何在 BQ7690x 上工作、如何使用外部 FET 来增大平衡电流, 以及平衡算法的系统注意事项。此外, 本文档还结合使用 BQ76907 的测试结果来展示电芯平衡功能, 以及电芯平衡的一般问题和故障排除技术。本文档介绍了如何将 BQ7690x 电芯平衡功能用于您的应用。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI), [BQ76907 适用于锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包的 2 节至 7 节串联高精度电池监控器和保护器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [BQ76905 适用于锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包的 2 节至 5 节串联高精度电池监控器和保护器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [BQ76907 技术参考手册](#)
- 德州仪器 (TI), [BQ76905 技术参考手册](#)
- 德州仪器 (TI), [Battery Management Studio \(BQStudio\) 软件](#)。
- 德州仪器 (TI), [BQ7690x 软件开发指南](#) 用户指南。
- 德州仪器 (TI), [BQ76907 产品页面](#)。
- 德州仪器 (TI), [BQ76905 产品页面](#)。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司