

Application Note

BMS 系统中的开路检测



Nanxiao Zhong, Kian Lin, Jayden Li

摘要

BMS 电压检测、电池端子和电流检测路径中的开路故障可能导致测量错误，并降低电动汽车和储能系统中的保护可靠性。本应用手册以 BMS 硬件和系统安全设计人员为目标，以 TI BQ76952、BQ78706 和 BQ79731 器件为例，介绍电芯输入开路行为和实际诊断。它介绍了适用于电芯检测输入的 AFE 内部电流源放电方法，适用于电池端子检测的 VBAT/VCn 比较，以及适用于电流分流检测路径的基于 GPIO 的方法或冗余 ADC 方法。这些方法有助于在残余电容器电压或缺失电流信息导致不安全的系统决策之前检测断开的线束，从而提高 BMS 诊断覆盖率、功能安全和系统可靠性。

内容

1 简介.....	2
2 电芯开路检测流程.....	2
2.1 VC ₁ -VC _{n-1} 开路检测.....	2
2.2 VC _n 开路检测.....	3
2.3 VC ₀ 开路检测.....	3
3 分流电阻开路检测.....	4
3.1 分流电阻的开路检测解决方案.....	4
3.2 带冗余 ADC 的电流检测诊断.....	5
4 其他诊断：VBAT、VSS.....	6
4.1 VBAT 开路检测.....	6
4.2 VSS 开路检测.....	7
5 总结.....	7
6 参考资料.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

故障诊断是 BMS 功能安全方面最重要的主题之一，有助于确保系统可靠运行。BMS 通常包含许多线束；如果检测线束断开或断开，系统可能会受到严重影响。本应用手册以 BQ76952 和 BQ79731 等器件为例讨论电池检测输入端的可靠开路检测，并提出了几种解决电池端子和电流检测路径开路检测难题的方法。

2 电芯开路检测流程

电芯开路检测是电池监测模拟前端 (AFE) 的关键诊断要求之一。大多数 TI 电池监测 AFE (如 BQ76952、BQ79718 和 BQ78706) 都集成了此功能。当电芯检测线开路时，连接到电芯输入端的外部滤波电容器可以长时间保持先前的电压。由于 AFE 电芯输入引脚通常保持高阻抗状态以更大限度地减小静态电流，因此该残余电压可能会保留在检测节点上，并可能导致 AFE 报告不正确的电芯电压测量值。

在典型的 AFE 开路检测方案中，会在 VC_1 至 VC_n 电芯输入引脚上 (相对于 VSS) 启用内部电流源。当启用电流源并且电芯电压检测路径中存在开路情况时，受影响检测节点上的残余电压会放电。然后，该器件可以根据产生的电芯电压行为来确定是否发生了开路故障。以下各节以 BQ76952 为例，介绍了详细的开路检测序列。

2.1 VC_1 - VC_{n-1} 开路检测

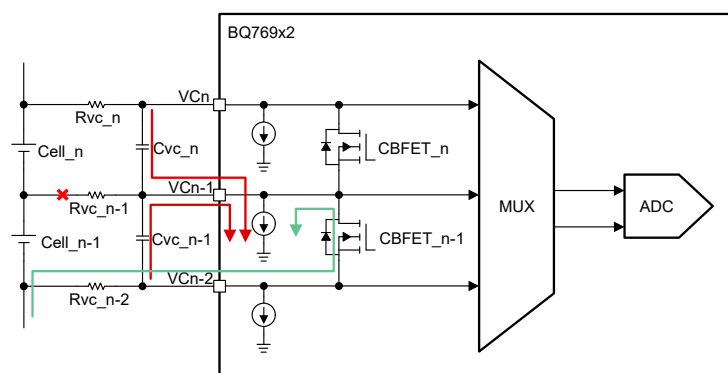


图 2-1. VC_1 - VC_{15} 开路检测期间的放电路径

如图 2-1 所示，如果不存在开路情况，电芯电压检测将不受影响。如果电芯输入引脚由于开路情况而处于悬空状态，该电流源将使电容放电，从而导致引脚电压缓慢下降。随着电容器的电压消耗，开路接线的电芯的电压在器件的输入端降低，这最终会触发 **电芯欠压** 保护故障 (CUV)。

开路电芯输入电容器中的电压下降也会导致其上方的相邻电芯随着开路电芯的电容消耗而成比例增加，这最终会导致 **电芯过压** 保护故障 (COV)。

因 OW 条件导致的电压变化可能触发器件的永久失效 (PF) 保护。OW 输入引脚上的电芯电压持续下降到足以触发 **安全欠压 PF** 或其上方电芯上的 **安全过压 PF**。

当 OW 源完全耗尽 OW 电芯时，相邻的顶部电芯输入现在测量到相对于输入引脚的两倍原始电芯电压。重要的是，要启用低压和过压保护以及 PF，并设置适当的阈值，以便检测开路情况并启动所需的反应。

备注

BQ769x2 没有专用的 OW 位来指示发生了开路情况。但是，可以根据 COV/CUV 保护和电芯电压来推测此状态。

如果分流电流检测路径中出现开路情况，**AFE** 将无法再确定实际负载电流。这种情况可能会导致严重的过流或过载事件。本节介绍了两种检测此故障的方法：分流电流检测开路诊断电路和冗余电流测量。

如图 3-1 所示, 本文通过在串联滤波电阻和 MCU GPIO 引脚之间添加电阻分压器来提出一种低成本诊断电路。在正常工作期间, MCU 引脚保持高阻抗状态 (Hi-Z), 因此电路不会引入额外的静态功耗。

在诊断操作期间，MCU 会将 GPIO 引脚驱动为高电平。这会将 SRN/SRP 引脚拉至足够高的电平，以便为 AFE 的内部 ADC 生成明显可测量的信号。通过读取 AFE 电流测量值，MCU 可以确定 SRP 和 SRN 引脚是短接在一起还是短接至 VSS。如果滤波电阻器和电流检测线未开路，AFE 报告的电流值应与根据电阻分压器网络计算出的预期值相匹配。如果滤波电阻器或电流检测线断开，则施加到电流检测输入的电压主要由 MCU 上拉电压决定，该电压可以直接触发 SCD 保护。

备注

在设计该电路时，请确保施加到 AFE 电流检测输入引脚 SRP 和 SRN 上的电压不超过这些引脚的绝对最大额定值。否则，MCU 上拉电压可能会损坏 AFE。

3.2 带冗余 ADC 的电流检测诊断

另一种成本更高的电流检测诊断方法是在单独的测量路径中添加独立的 ADC 通道。该冗余测量路径有助于检测电流检测路径中的开路情况或主要 ADC 测量中的异常。例如，可以使用 INA194 或 AMC1350 等双向电流检测器件来实现冗余电流测量。但是，这种方法会增加总体系统成本，并引入额外的静态电流消耗。

在储能系统 (ESS) 应用中，TI 的 BQ79731 UMI 传感器集成了两个独立的电流检测 ADC。开路检测可通过将冗余 ADC 与独立的 RC 输入路径结合使用来实现。这种方法可以简化系统设计，并有助于提高功率密度。

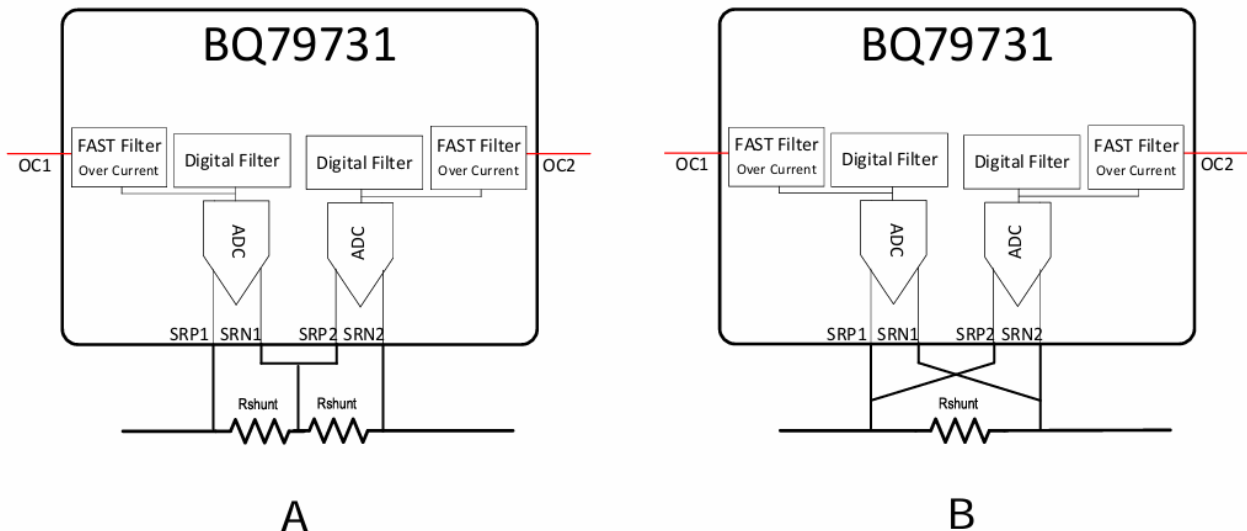


图 3-2. 利用 BQ79731 进行冗余电流检测诊断

4 其他诊断：VBAT、VSS

4.1 VBAT 开路检测

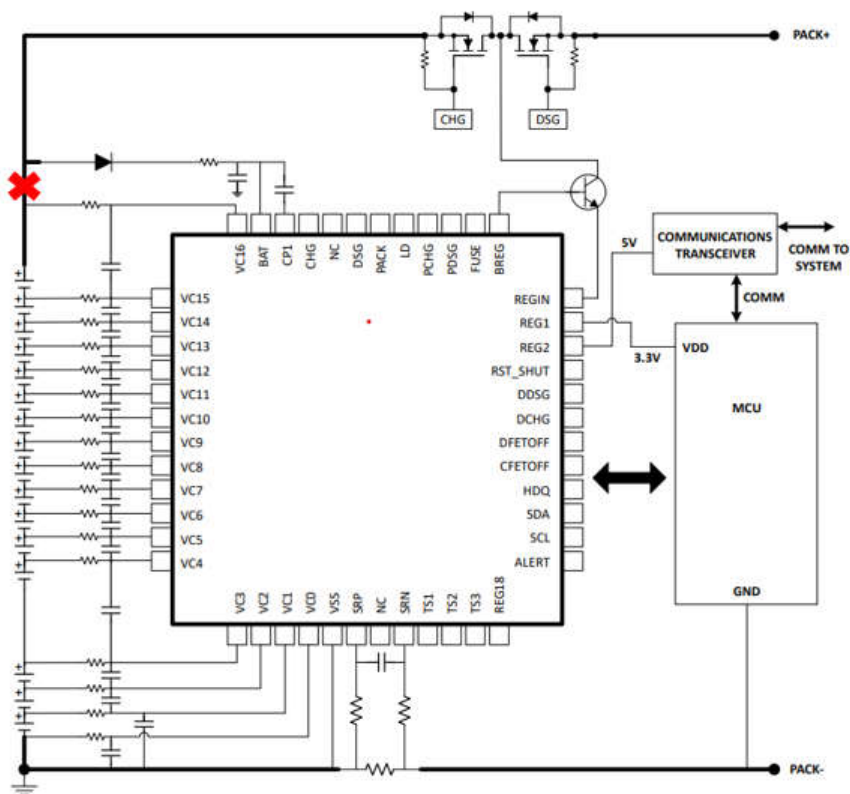


图 4-1. VBAT 开路检测

在 BMS 设计中，通常建议将 VC_n 检测电缆和电源电缆连接单独布线。AFE 通过 PCB 布线由电源线供电。 VC_n 电压与 VBAT 读数之间的差值可用于确定是否发生了开路情况。在 BQ76952 中，VBAT 欠压情况可以强制器件进入关断模式，以保护系统。

4.2 VSS 开路检测

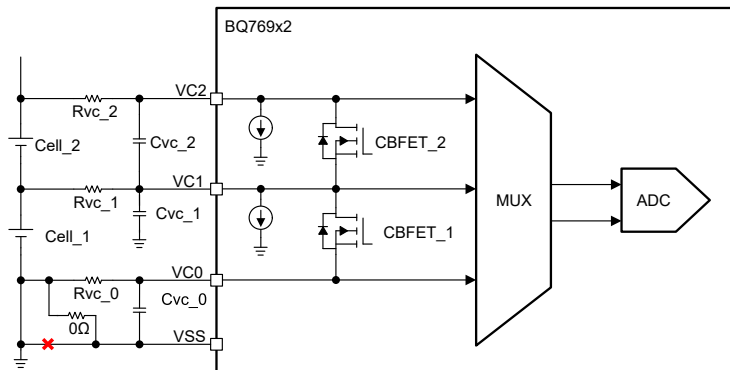


图 4-2. VSS 开路检测

VSS 开路情况可以由 MCU 测量引脚电压 (例如 REG18 或具有分压电阻网络的 REG1) 来检测。当 VSS 为开路时, IC 的内部 VSS 会通过二极管压降电压在电路板 GND 上方悬空。AFE 相对于内部 VSS 生成 REG18 和 REG1, 因此 REG18 和 REG1 相对于电路板 GND 高于正常值。所以 MCU 可以测量该故障。

5 总结

本应用手册总结了 BMS 的开路检测方法, 可帮助 BMS 设计人员了解典型的开路故障机制, 并提供实用电路和诊断设计指南, 可提高 EV、数据中心和 ESS 应用中的系统可靠性、保护精度和功能安全稳健性。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [BQ76952 适用于锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包的 3 至 16 节串联高精度电池监测器和保护器](#), 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [BQ76952 技术参考手册](#), 技术参考手册。
3. 德州仪器 (TI), [使用 BQ769x2 电池监测器系列和低侧 FET](#), 应用手册。
4. 德州仪器 (TI), [BQ769x2 电池监控器的微控制器代码示例](#), 代码示例。
5. 德州仪器 (TI), [\[FAQ\] BQ76952 : TI BQ769x2 系列电池监测器的常见问题](#), 常见问题解答。

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