

Application Note
适用于电池管理系统的 BQ769x2 系列电流检测设计注意事项



Kian Lin, Terry Sculley

摘要

高电流检测精度在电池管理系统 (BMS) 中至关重要，它有助于提高电池充电状态 (SoC) 的精度并提高整个系统的可靠性。本文分享了电流检测的设计注意事项，并介绍了如何使用电池监测器件 BQ76972 实现高精度、高可靠性的电流测量。

内容

1 简介.....	2
2 BQ769x2 库仑计数器电流误差计算.....	2
3 检测电阻设计注意事项.....	3
4 电流检测电路诊断.....	4
5 库仑计数器的累积电荷积分.....	4
6 系统实现.....	5
7 总结.....	6
8 参考资料.....	7
9 修订历史记录.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

电池供电产品正变得日益普及，涵盖储能系统、真空吸尘器、电动工具、电动自行车和电动滑板车等领域。由于重量限制和需要更长的续航能力，电池组的电芯化学成分正在从铅酸转为锂离子、锂聚合物或磷酸铁锂 (LiFePO₄) 类型。各个参数始终需要良好的测量精度，尤其是电芯电压、电池包电流和电芯温度。为了实现准确的保护和电池包荷电状态 (SoC) 的计算，必须保持良好的精度。因为磷酸铁锂电池包应用具有稳定的电压，所以对它来说尤其必须保持良好的精度。

本文深入介绍了锂电池的电流检测技术，包括误差计算和适当的系统配置。以专为锂离子、锂聚合物或磷酸铁锂电池应用设计的 BQ76972 高精度电池监控与保护器为例，详细分析其应用要点。

2 BQ769x2 库仑计数器电流误差计算

电流测量误差包括 BQ76972 库仑计数器误差和检测电阻器产生的误差。本文阐述了如何计算 BQ769x2 库仑计数器在整个电流测量范围内最坏情况下的误差，该误差可通过累加各项最坏情况误差 (包括偏移误差、增益误差、微分非线性误差 DNL 和积分非线性误差 INL) 得出。噪声的影响不会被视为测量结果。

库仑计数器的具体规格参数请参阅 [BQ76972 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，如 [表 2-1](#) 所示。

表 2-1. BQ76972 库仑计数器规格

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V _(CC_IN)	测量的输入电压范围	V _{SRP} - V _{SRN}		-0.2	0.2 V
V _(CC_IN)	测量的输入电压范围	V _{SRP} 、V _{SRN}		-0.2	0.2 V
V _(CC_IN_EXTENDED)	测量的扩展输入电压范围	V _{SRP} - V _{SRN} ，在范围内进行扫描以确定测量值趋于平坦的位置		-1	1 V
B _(CC_INL)	积分非线性	16 位，输入电压范围最佳拟合，使用 0V 共模电压。	±5.2	±22.3	LSB
B _(CC_DNL)	微分非线性	16 位，无丢码	±0.1		LSB
V _(CC_OFF)	偏移误差	16 位，未经校准	-1	1	LSB
V _(CC_OFF_DRIFT)	失调电压误差漂移	16 位，校准后	-0.03	0.03	LSB/°C
B _(CC_GAIN)	增益	16 位，针对输入电压范围过度设计	130845	131454	132335 LSB/V
R _(CC_IN)	有效输入电阻		2		M Ω

考虑到热性能，±0.2V 输入范围通常无法得到充分利用。例如，要检测 100A 的连续放电电流，应选择小于 0.5mΩ 的检测电阻来实现小于 5W 的功率损耗。50mV 输入范围内的最坏情况误差由各项误差按 ADC 分辨率 (LSB) 计算得出。可使用以下公式计算总误差：

$$\text{Error}_{\text{total}} = \text{Error}_{\text{Offset}} + \text{Error}_{\text{Gain}} + \text{Error}_{\text{DNL}} + \text{Error}_{\text{INL}} \quad (1)$$

在计算最坏情况下的偏移误差时，还需要考虑温度漂移。此计算假设最大温度变化范围为 25°C 至 -40°C。最坏情况下的偏移误差可通过计算得出：

$$\text{Error}_{\text{Offset}} = 1 + 0.03 \times (25 - (-40)) = 2.95 \text{ LSB} \quad (2)$$

增益误差是典型增益值与特定增益范围内最坏情况增益因子之间的差值。使用 50mV 的输入范围，最坏情况下的增益误差可由计算得出：

$$\text{Error}_{\text{Gain}} = 0.05 \times (132335 - 131454) = 44.05 \text{ LSB} \quad (3)$$

数据表仅规定了 0.1LSB 的典型值。此计算假设最坏情况下误差为 1LSB DNL。最坏情况下的 INL 误差仅发生在输入电压约为 200mV 时。对于 50mV 输入范围，使用 5.2LSB 进行计算。

可使用以下公式计算总误差：

$$\text{Error}_{\text{total}} = \text{Error}_{\text{Offset}} + \text{Error}_{\text{Gain}} + \text{Error}_{\text{DNL}} + \text{Error}_{\text{INL}} = 53.2 \text{ LSB} \quad (4)$$

对应电压值 53.2LSB 的计算结果为：

$$V_{\text{error_total}} = 53.2 \times 7.6\mu\text{V} = 0.404\text{mV} \quad (5)$$

最终，在 50mV 输入范围内，库仑计数器的最坏情况误差百分比为 0.81%。此计算假设所有最坏情况误差因素简单相加，且未采用任何数字滤波和校准措施。在实际应用中，该误差不太可能那么大。

按照 [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南](#) 的校准部分，可以校准偏移误差和增益误差。实际上，校准后，总电压误差变为：

$$V_{\text{error_total}} = (1.95 + 1 + 5.2) \times 7.6\mu\text{V} = 0.062\text{mV} \quad (6)$$

在没有任何数字滤波器的情况下，50mV 输入范围内仅导致 0.12% 的百分比误差。

3 检测电阻设计注意事项

在电池管理系统中，分流电阻器因其高精度、低成本和简易性，成为测量充放电电流的常用选择。但若设计和校准不当，分流电阻器的误差可能成为电流测量误差的主要因素。

电阻的容差和温度系数是表示电阻器精度的关键规格。在室温下执行校准可以消除分流器的容差误差，但很难校准温度漂移误差，因其随温度发生变化。特别是，对于 BMS 应用，一些低电压电池包是自然冷却的，这意味着较小的温度系数有助于提高电流检测精度。

根据塞贝克效应，热电动势也会影响精度。热电动势可能会带来数十至数百微伏的误差，这在满量程范围非常小的情况下是不可接受的。因此，在选择分流电阻器时，尽可能减少温升非常重要。

为了更大限度地降低温升的影响，应设计为选用高额定功率和较小温度系数的分流电阻器。此外，需要仔细设计 PCB 布局，以优化热性能和电流方向，从而不会影响分流温度系数。

另一种方法是开尔文连接，如 [图 3-1](#) 所示。使用两根独立的导线来测量差分电压。该配置可以消除配线电阻和分流铜电极温度漂移导致的误差。

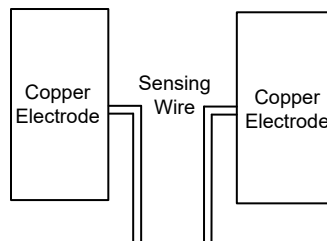


图 3-1. 开尔文连接

4 电流检测电路诊断

分流器通过滤波网络直接连接到 BQ76972 的 SRP 和 SRN 引脚。但 BQ76972 无法区分电流检测电路的开路和短路事件。出于功能安全考虑，需要一个简单的外部电路来诊断这些异常事件以及 BQ76972 电流检测功能的工作条件，如图 4-1 所示。

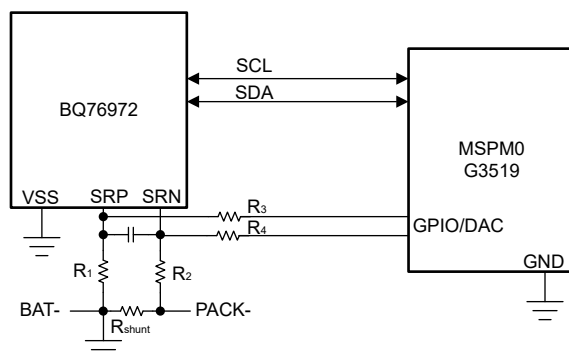


图 4-1. 电流检测电路诊断

在 BQ76972 的 SRN/SRP 引脚与微控制器 GPIO 或 DAC 之间添加串联电阻 R_3 和 R_4 。 R_3 和 R_4 在滤波器电阻 R_1 和 R_2 与接地端之间形成一个电阻分压器。在正常运行时，MCU 引脚处于高阻抗状态，具有极小的泄漏电流，因此正常电流检测精度不受影响。在诊断操作时，MCU 可以将引脚驱动为高电平，然后在 SRP 和 SRN 之间产生分压，因此通过读取 BQ76972 电流测量值，MCU 可以区分 SRP/SRN 引脚是否短路或连接至 VSS。此外，该方法可用于诊断 BQ76972 的 SCD、OCC 和 OCD 功能。通过调整串联电阻的大小，以触发电流相关保护警报或故障。

由于电流测量采用差分方式，MCU 引脚泄漏电流影响可以忽略。若仅添加 R_3 或 R_4 ，MCU 引脚的泄漏电流需足够低，以免影响电流检测精度。库仑计数器的分辨率为 7.6uV，因此建议泄漏电流低于 70nA，以确保 R_1 或 R_2 上的压降不会引起 LSB 误差。

5 库仑计数器的累积电荷积分

BQ769x2 库仑计数器可以通过串行通信接口读出，提供多种可供读取的电流值，其中两个使用单独的硬件数字滤波器 CC1 和 CC2，还有一个使用固件滤波器 CC3。

要计算 SOC，可以使用 CC1 滤波器生成 16 位电流测量值，当器件在“正常”模式下运行时，每 250ms 生成一个输出。可以从 0x0075 DASTATUS5() 子命令获取 CC1 电流数据。

可以通过 0x0076 DASTATUS6() 子命令以 64 位值的形式提供积分通过电荷，其中包括以 userAh 为单位的累积电荷的高 32 位，作为小数部分的累积电荷的低 32 位，以及 32 位累积时间，在该时间上以秒为单位对电荷进行积分。可以使用 0x0082 RESET_PASSQ() 子命令重置累积电荷积分和计时器。如果该器件经历部分复位或使用 RST_SHUT 引脚复位，则需要发送 0x0082 RESET_PASSQ() 以确保正确初始化电荷累积。

累积电荷值由整数部分与小数部分直接相加得出。例如，0xFFFFFFF 是测量值的整数部分，采用二进制补码格式，数据代表十进制 -3。另外，读取的小数部分为 0x7FFFFFFF，该值始终为 0 至 2^{32} 之间的正数，其十进制值为 0.5。二者相加后，测得累积电荷为 -2.5mAh。

库仑计的 LSB 大小为 7.6uV，但也可以检测到小于 LSB/R_{sense} 的电流。库仑计数器的设计可以确保即使系统的电流较低，内部电路仍可以保持从一个样本到另一个样本的量化。BQ769x2 能够检测电流，得出远低于 7.6uV 的检测电阻电压并累积电荷。

图 5-1 提供了 0.3mΩ 检测电阻两端的微小放电电流测量测试结果。还可以累积低于 LSB/R_{sense} - 25mA 的电流。BQ769x2 在室温下具有 3-4uV 的偏移电压，因此在施加零衰减电流时，可以观察到正累积电荷。当放电电流大约在 1.5mA 时，累积的电荷变为零。

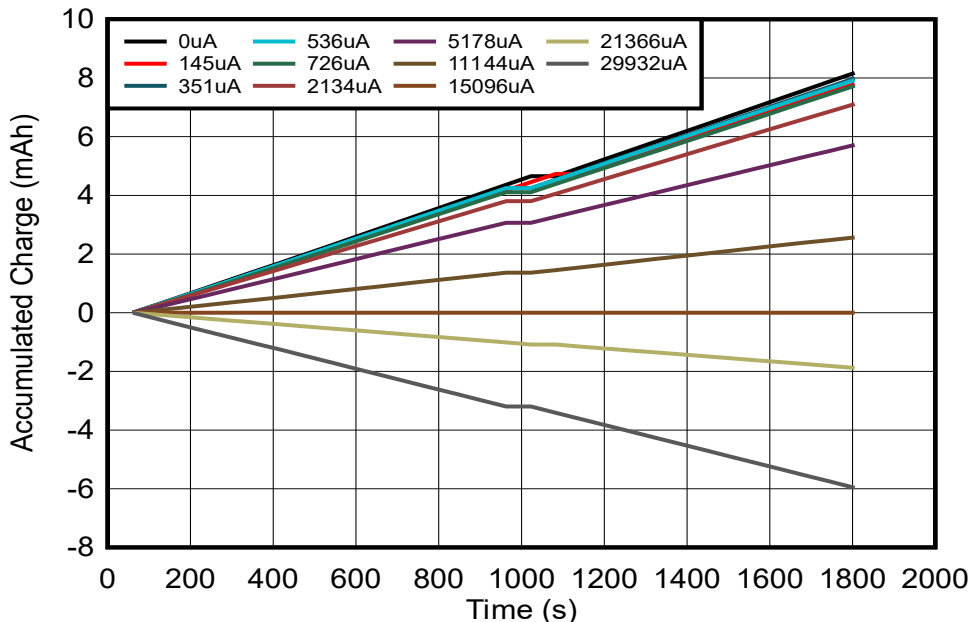


图 5-1. 累积的电荷结果

同时，BQ769x2 还支持同步电压和电流测量，以计算 SOC。0x0071 DASTATUS1()、0x0072 DASTATUS2()、0x0073 DASTATUS3() 和 0x0074 DASTATUS4() 子命令以 32 位格式提供电芯电压测量，以及与每次电芯电压测量同时进行的同步电流测量的原始 ADC 计数。数据由数据转换器以 24 位格式生成，但以 32 位格式提供。24 位数据包含在 32 位数据的低 3 个字节中，并进行符号扩展以创建高字节。借助同步电压和电流测量，用户可以使用自定义滤波算法对数据进行滤波和处理，而无需像使用 CC1 电流测量那样将数据量化为 16 位。

6 系统实现

计算结果显示了电流测量误差的最坏情况误差，但仍需使用物理板来评估实际误差。建议将 BQ769x2 接地端连接到电池负极端子。建议的 SRN 和 SRP 引脚电压为 -0.2V 至 0.75V，因此建议电池负极端子和分流电阻器之间的布线尽可能短。否则，在大瞬态电流期间，引脚电压可能会超过建议的范围。

在进行精度测试之前，需要执行电流校准以消除分流容差误差、库仑计数器偏移和增益误差。可按照 [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南](#) 中校准部分的指南，校准电路板偏移量。然后，也可以按照本应用笔记的指导，在固定电流下校准增益误差和分流电阻容差误差。

MSPM0 软件开发套件 (SDK) 提供了基于参考设计 [面向 48V 至 1500V 储能系统的高精度电池管理单元参考设计](#) 的校准演示代码。安装 MSPM0 SDK 和 CCS 后，请在以下位置找到 MSPM0 SDK 的源代码：

```
<install_location>\ti<SDK_version>\examples\nortos\LP_MSPM0G3519\demos\bq769x2_TIDA010247
```

图 6-1 展示了室温下的 TIDA-010247 电池包电流精度数据。使用默认 80 个 CC3 样本进行 CC3 电流测量。当放电电流低于 5A 时，最大电流误差低于 20mA；当放电电流高于 5A 时，最大电流误差为 0.2%。

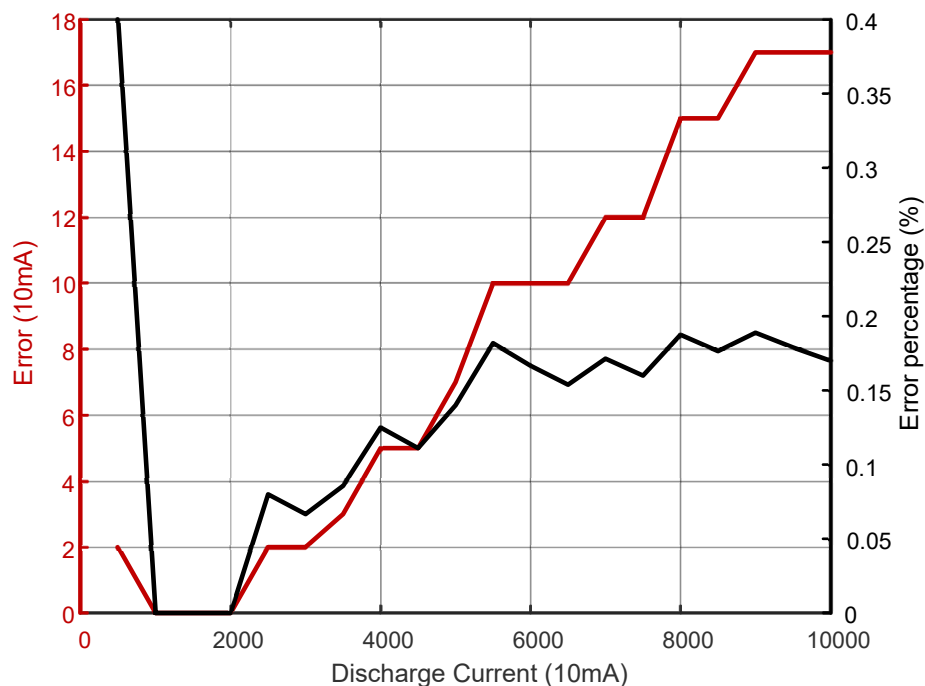


图 6-1. 电池包电流精度

7 总结

本文介绍了 BQ769x2 电流检测的设计注意事项。在开始设计之前可以计算电流精度，并按照本文中的建议进行改进。如果需要对电流检测电路进行诊断，也推荐了一个诊断方案。本文还展示了读取累积电荷积分的示例，可用于 SoC 计算或其他决策目的。

8 参考资料

- 德州仪器 (TI) , [\[FAQ\] BQ76952 : 如何计算 BQ769x2 中的库仑计数器电流误差 ?](#)
- 德州仪器 (TI) , [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南](#)
- 德州仪器 (TI) , [BQ769x2 技术参考手册](#)

9 修订历史记录

Changes from Revision * (June 2025) to Revision A (August 2025)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 将 电池包电流精度 图像中的 mA 更改为了 10mA	5

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司