

电量计假电流原因分析及解决办法

朱明武 (Mingmo Zhu)

TI Shenzhen

ABSTRACT

电量计监测电池电压、电流和温度，用于电池保护、电量计量等功能。在开发应用过程中，有不少客户反馈没有充放电时电量计显示电流不为 0，称之为假电流。假电流偏大时影响到电量计量准确性、甚至误触发电池永久失效等，因此不得不重视假电流。假电流的产生跟高频干扰、采样电阻热电动势、采样回路电压偏移等原因有关。本文结合假电流案例分析，从电量计电流采样机理出发，分析假电流影响、原因及解决办法。

Contents

1. 电量计电流采样机理	2
2. 电量计假电流的影响	2
3. 电量计假电流原因分析	3
4. 电量计假电流解决办法	4
5. 电量计假电流案例分析	6
6. 总结	7
参考文献	7

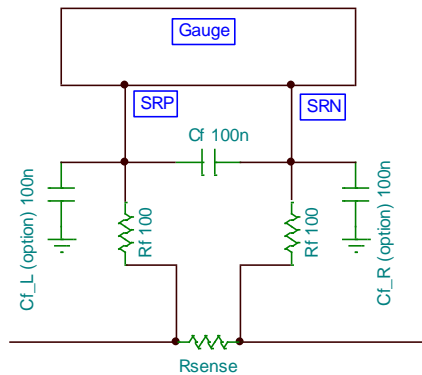
Figures

Figure 1. 电量计电流采样机理	2
Figure 2. 电流采样路径接法	5
Figure 3. CFET PF 触发	6
Figure 4. CFET PF 触发时电量计采样的电流	6
Figure 5. CFET PF 触发的条件	7
Figure 6. 高频干扰复现假电流触发 CFET PF	7

1. 电量计电流采样机理

电量计监测电池电压、电流和温度，用于电池保护、电量计量等功能。TI 电量计（比如 [BQ40Z50-R2](#), [BQ28Z610](#) 等）都集成一个 16 位 delta-sigma ADC 采样电池电流，和另一个 16 位 delta-sigma ADC 采样电池电压和温度，可以做到电压和电流同步采样。

电池内部充放电回路放置一个采样电阻 R_{sense} （又称 current sense resistor, Shunt resistor），电流流经采样电阻产生压差，经过 RC 滤波电路调理后进入电量计的 SRP 和 SRN 引脚，电量计的 ADC 采到过 SRP 和 SRN 电压除以采样电阻即可计算回路的充放电电流。图 1 说明了电量计电流采样机理。



$$I = \frac{U}{R} = \frac{V(SRP) - V(SRN)}{R_{sense}}$$

Figure 1. 电量计电流采样机理

电流 ADC 支持 $-0.1V \sim +0.1V$ 双极性输入。当 SRP/SRN 引脚压差 $VSR = V(SRP) - V(SRN)$ 为正时，电量计 BQ40Z50-R2 采样到正电流，识别为充电电流。当 SRP/SRN 引脚压差 $VSR = V(SRP) - V(SRN)$ 为负时，电量计 BQ40Z50-R2 采样到负电流，识别为放电电流。同时电量计 BQ40Z50-R2 内部 Coulomb Counter 持续积分电流。

通过电量计的 SBS 标准命令 `Current()` 可以读到电量计采样的电流。`Current()` 在正常工作模式下每秒刷新一次。各个电量计的 `Current()` 命令可能不同，比如 BQ40Z50-R2 是 `0x0A`，BQ28Z610, BQ27Z561 是 `0x0C`。

当没有对电池充电或放电时，电量计显示电流应该为 0；如果显示电流不为 0，则称此电流为假电流。

2. 电量计假电流的影响

当假电流高于库仑计积分门限(CC Dead Band)时它就会被纳入电量积分，影响电量计量准确性。比如正向假电流累积导致没有充电时容量上升；负向假电流累积导致没有放电时容量下降。

假电流过大时甚至会误触发电池永久失效等。比如当电池包充电 MOSFET 或放电 MOSFET 损坏时，电量计 BQ40Z50-R2 会触发电池永久失效保护，去熔断保险丝。而电量计判断充电 MOSFET 或放电 MOSFET 损坏的标准是在 MOSFET 处于断开状态并且检测到电流超过门限值，因为正常情况下 MOSFET 断开时没有电流回路电流应该为 0。表格 1 是 Discharge FET Permanent Fail 的触发条件：

表 1: Discharge FET Permanent Fail 的触发条件

Status	Condition	Action
Normal	DSG FET off AND $Current() > DFET:OFF\ Threshold$	$PFAAlert()[DFETF] = 0$
Alert	DSG FET off AND $Current() \leq DFET:OFF\ Threshold$	$PFAAlert()[DFETF] = 1$
Trip	DSG FET off AND $Current()$ continuously $\leq DFET:OFF\ Threshold$ for $DFET:OFF\ Delay$ duration	$PFAAlert()[DFETF] = 0$ $PFStatus()[DFETF] = 1$

所以当 MOSFET 断开时如果检测到假电流并达到门限值则认为 MOSFET 损坏了，就会误触发电池永久失效。

3. 电量计假电流原因分析

从电流采样机理分析，没有充放电时仍有假电流的原因可分为三部分：（1）信号源，即采样电阻两端有压差；（2）信号调理，即输入调理电路引入压差；（3）信号转换显示，即电流转换及显示。

3.1 采样电阻两端有压差

正常情况下，没有充放电电流时采样电阻两端没有压差，电流为 0。如果此时采样电阻两端有压差，则首先需要检查电路板是否有其它漏电回路。沿着电势差路径顺藤摸瓜定位漏电原因。

此外，采样电阻热电动势(Thermal electromotive force, Thermal EMF)也会造成采样电阻两端有压差。大家在选择采样电阻时，一般会考虑阻值、功率、封装、温漂等，但是往往会忽略热电动势。当温度变化时，在不同导电材料的接触面上会产生热电动势。热电动势的典型应用是热电偶，用来测量温度。采样电阻材料与引脚材料不同。当电阻两个接合点温度不一致时就会在电阻两端产生压差。这个压差大小取决于材料的热电动势系数(Seebeck coefficient, EMF coefficient)和两个接合点的温度差。比如，Ni/Cu 镍铜合金的热电动势是 $-40\mu V/^\circ C$ ，当温差达到 $10^\circ C$ 时即可产生 $400\mu V$ 的压差，加在阻值为 $1m\Omega$ 的电阻则意味会产生 $400mA$ 假电流。如果要排查热电动势带来假电流的影响，则可以通过对电阻吹热风测量电阻两端压差或者看电流读数来确定。

3.2 输入调理电路引入压差

从图 1 电流采样路径看到，从采样电阻两端经过 RC 滤波电路后进入电量计芯片的 SRP/SRN 引脚。即使电阻两端压差为 0，如果这个输入调理电路引入压差那么也会导致 SRP/SRN 引脚之间压差不为 0，从而使电量计采样到假电流。

以下几种情况都有可能致输入调理电路引入偏差：

- (1) 滤波电路不对称，比如阻抗不平衡、走线不平行。
- (2) 差分滤波电容损坏。
- (3) 共模滤波电容接地电平不一致，一高一低导致额外压差。所以图 1 里两个 Cf_L, Cf_R 电容可以不贴。
- (4) 高频干扰，比如用对讲机在电池旁边测试，容易看到假电流。

3.3 电流转换及显示

如果 SRP/SRN 引脚压差恒定为 0，而电量计电流显示电流不为 0，则需要检查电流转换及显示方面的原因。

电量计 IC 采样转换后经过校准(offset, gain)，如果电流小于 Deadband 则显示为 0，大于 Deadband 则显示出来。

先检查电流是否已经校准，校准参数 CC Offset, Board Offset 与正常样品比较是否合理，Deadband 是否正常。如果差异很大，可把正常品的 CC Offset, Board Offset, Deadband 复制过来再验证假电流。

对 IC 和板子做交叉验证，如果不良现象跟随 IC，则可考虑做失效分析。

4. 电量计假电流解决办法

前面已经从假电流信号源、信号调理及信号转换显示方面分析了电量计假电流的原因及如何排查。下面从采样电阻选型、采样电路设计及 layout、电流校准、参数设置等方面介绍假电流的预防及解决办法。

4.1 采样电阻选型

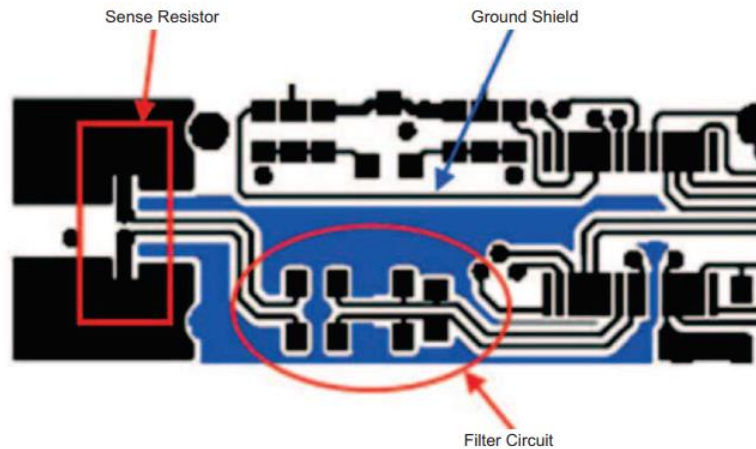
从信号源方面预防假电流。

- (1). 小阻值。为了降低电池在采样电阻的压降和损耗，一般选择小阻值，比如 $1\text{m}\Omega\sim 5\text{m}\Omega$ 。充放电最大电流乘以阻值不能超过 ADC 最大输入范围，比如 BQ40Z50-R2 的 $-0.1\text{V}\sim +0.1\text{V}$ 。同时，要考虑短路时 SRP/SRN 引脚相对 VSS 的负压不超过 -0.3V 。还要兼顾电流采样精度，小阻值乘以小电流其压差很小，所以在满足压降和损耗前提下可以选择稍大一点的阻值，比如 $1\text{m}\Omega\sim 3\text{m}\Omega$ 都满足要求的话选择 $3\text{m}\Omega$ ，也节省采样电阻成本。BQ40Z50-R2 的电流 ADC 的 Effective Resolution 1LSB 典型值为 $3.71\mu\text{V}$ 。除以相应的采样电阻阻值可换算电流分辨率。
- (2). 高精度。比如选择 1%精度采样电阻。
- (3). 低温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR)。TCR 表示当电阻温度变化 1°C 时电阻阻值相对变化量，单位为 ppm/ $^\circ\text{C}$ （百万分率）。一般建议选择温漂 50ppm 以内的采样电阻，以降低温度变化带来阻值变化导致电流误差的影响。
- (4). 低热电动势(Thermal electromotive force, Thermal EMF)。当温度变化时，在不同材料的接触面上会产生热电动势，因此要选择 Thermal EMF 较低的电阻材料，比如 $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以下的锰铜合金。铜合金材料因成份不同而有很大差异，比如镍铜是锰铜 40 倍，所以避免选择镍铜材料。
- (5). 功率和尺寸。电量计对采样电阻的功率和尺寸没有要求。选型时主要考虑不超过电阻额定功率、电大脉冲功率。

4.2 电流采样电路设计及 layout

从信号输入调理电路方面预防假电流。

- (1). 电路设计要留有 RC 滤波电路，如图 1 的 R_f 100 Ω 和 C_f 0.1 μ F。 C_f _L, C_f _R 电容可以不贴。滤波 RC 要尽量靠近 IC。滤波网络铺地包围。
- (2). 开尔文(Kelvin)接法连接采样线。SRP/SRN 走线平行。图 2 示例说明 Kelvin 连接方法。
- (3). 采样线从电阻端头焊盘的中间取出，不受 PCB 铜箔影响。避免包含 PCB 上较长的铜皮，由于铜的 TCR 值达到 4000ppm/ $^{\circ}$ C（或 0.4%/ $^{\circ}$ C），也就是说仅仅 10 $^{\circ}$ C 的温度变化即可引起 4% 的阻值变化。
- (4). 为了减少热电动势带来的影响，除了前面选择低热电动势材质的电阻外，在 layout 时要注意让采样电阻平行于热源，不要让电阻一头靠近热源而另一头远离热源。



(Source: BQ40Z50-R2 datasheet)

Figure 2. 电流采样路径接法

4.3 电流校准

从信号转换及显示方面预防假电流。

电量计一般会有 CC Offset 和 Board Offset 等参数可用来校准电流偏置。BQ27542, BQ27546 等电量计的 bqStudio>>Calibration 即提供 CC Offset 和 Board Offset 校准按钮。BQ40Z50-R2, BQ27Z561 等电量计由于硬件性能提升，CC Offset 和 Board Offset 可以不需要校准了；如果仍有假电流，可以参考《*bq40zxx Manufacture, Production, and Calibration Application Note (SLUA734A)*》校准指南进行校准。

4.4 参数设置

- (1). 从信号显示方面屏蔽假电流。

Deadband，如果电流绝对值小于 Deadband 则显示为 0mA，大于 Deadband 则如实显示出来。通常可设置 3~5mA。

- (2). 通过参数设置降低假电流对容量积分的影响。

CC Deadband (Coulomb Counter Deadband)，如果电流绝对值小于 CC Deadband 则不纳入库仑积分，大于 CC Deadband 则纳入库仑积分。以 116nV 为单位，可通过以下公式计算电流值：

$$CC \text{ Deadband Current} = \frac{CC \text{ Deadband} \times 116nV}{Rsense}$$

(3). 通过参数设置降低假电流误触发永久失效的影响。

当 CHG FET off AND Current() continuously \geq CFET:OFF Threshold for CFET:OFF Delay duration 时会触发 Charge FET Permanent Fail;

当 DSG FET off AND Current() continuously \leq DFET:OFF Threshold for DFET:OFF Delay duration 时会触发 Discharge FET Permanent Fail;

则需要放宽 CFET:OFF Threshold, CFET:OFF Delay duration, DFET:OFF Threshold, DFET:OFF Delay duration 四个参数, 以屏蔽假电流误触发。

比如, 考虑采样电阻热电动势造成的假电流, 则根据 $CFET \text{ Off Threshold} > \frac{EMFR \times \Delta T}{Rsense}$, 比如考虑 60 度温差其热电动势的影响。

5. 电量计假电流案例分析

下面分析一个高频干扰引起假电流导致充电 MOS(CFET) PF 误触发的案例。

案例背景是客退一个用 BQ40Z50 的成品电池无输出、无法充电或放电。

查看电池通讯正常, 用 bqStudio 能读到电池处于满充状态 RSOC=100%, [XCHG]=1, [XDSG]=1, 充放电 MOS 断开, [CFETF]=1, 电池触发了充电 MOS CFET PF 永久失效, 三端 Fuse 已经熔断, 如图 3 所示, 所以电池无输出、无法充电或放电。

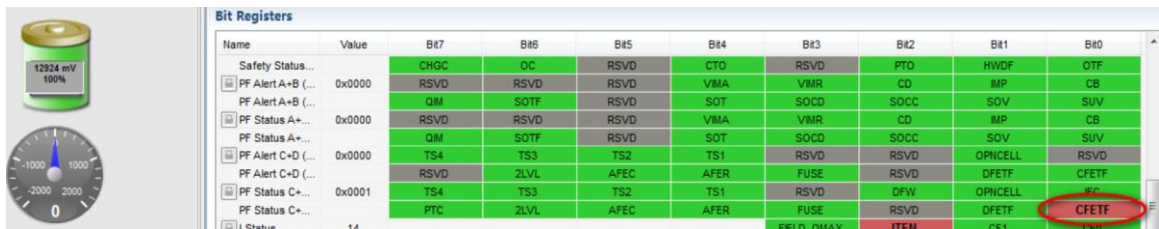


Figure 3. CFET PF 触发

分析 GG 文件里 PF Status 的记录, 发现触发 PF 时的电流为 139mA (图 4), 高于 CFET PF 的门限 CFET:OFF Threshold 100mA (图 5), 说明当时确实可能满足 CFET PF 条件: 当 CHG FET off AND Current() continuously \geq CFET:OFF Threshold for CFET:OFF Delay duration 时会触发 Charge FET Permanent Fail.

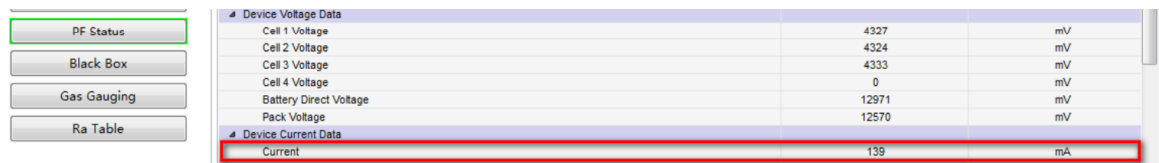


Figure 4. CFET PF 触发时电量计采样的电流

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司