

Application Note

BQ41xxx 生产校准指南



摘要

本应用手册详细介绍了 bq41xxx 器件的制造测试、电芯电压校准、BAT 电压校准、PACK 电压校准、电流校准 (CC) 和温度校准功能。

内容

1 制造测试.....	2
2 校准.....	3
2.1 电芯电压校准.....	4
2.2 BAT 电压校准.....	5
2.3 PACK 电压校准.....	6
2.4 电流校准.....	6
2.5 温度校准.....	8
3 参考资料.....	10
4 修订历史记录.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 制造测试

为了改进制造测试流程，电量监测计器件允许通过 *ManufacturerAccess()* 命令开启或关闭某些功能。例如 *PRE-CHG FET()*、*CHG FET()*、*DS FET()*、*Lifetime Data Collection()*、*Calibration()* 等。仅启用被测功能可以避免任何功能干扰，从而简化生产中的测试流程。这些切换命令只会设置 RAM 数据，这意味着如果向电量监测计发出复位或密封命令，那么这些命令设置的条件将被清除。*ManufacturingStatus()* 跟踪每个功能的状态（启用或禁用）。

数据闪存 *ManufacturingStatus* 提供启用或禁用单个功能以进行正常操作的选项。在收到复位或密封命令时，*ManufacturingStatus()* 将从数据闪存 *ManufacturingStatus()* 重新加载。这也意味着如果对 *ManufacturingStatus()* 进行更新以启用或禁用某个功能，则只有在发送复位或密封命令时，电量监测计才会采用新设置。

2 校准

该器件集成了支持电流、电压和温度读数校准的例程，当 `ManufacturingStatus()[CAL]` 位开启时可在向 `ManufacturerAccess()` 写入 `0xF081` 或 `0xF082` 后访问这些例程。当校准处于活动状态时，可在 `ManufacturerData()` 上获取原始 ADC 数据。如果发送任何其他 MAC 命令或该器件被复位或密封，那么该器件将停止在 `ManufacturerData()` 上报告校准数据。

备注

校准完成后必须关闭 `ManufacturingStatus()[CAL]` 位。该位在复位或密封后清除。

ManufacturerAccess()	说明
0x002D	启用/禁用 <code>ManufacturingStatus()</code> [CAL]
0xF080	禁用 <code>ManufacturerData()</code> 上的原始 ADC 数据输出
0xF081	在 <code>ManufacturerData()</code> 上输出电压、电流和温度的原始 ADC 数据
0xF082	在 <code>ManufacturerData()</code> 上输出电压、电流和温度的原始 ADC 数据。该模式支持库仑计数器输入 (SRP、SRN) 内部短路。

`ManufacturerData()` 输出格式为：ZZYYaaAAAbbBBccCCddDDeeEEfffGGghHHiiIJJkkKKK，

其中：

值	格式	说明
ZZ	字节	8 位计数器，在刷新原始 ADC 值时递增 (每 250ms 递增一次)
YY	字节	输出状态 <code>ManufacturerAccess() = 0xF081 : 1</code> <code>ManufacturerAccess() = 0xF082 : 2</code>
AAaa	二进制补码	电流 (库仑计数器)
BBbb	二进制补码	电芯电压 1
CCcc	二进制补码	电芯电压 2
DDdd	二进制补码	电芯电压 3
EEee	二进制补码	电芯电压 4
FFff	二进制补码	PACK 电压
值	格式	说明
GGgg	二进制补码	BAT 电压
HHhh	二进制补码	电芯电流 1
Iiii	二进制补码	电芯电流 2
JJjj	二进制补码	电芯电流 3
KKkk	二进制补码	电芯电流 4

2.1 电芯电压校准

图 2-1 阐释了电芯电压校准。

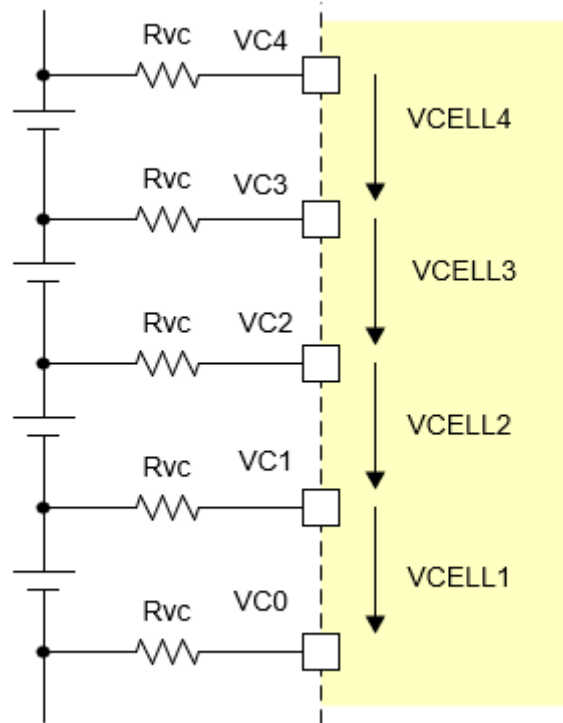


图 2-1. 电芯电压校准

TI bq41zXXX 器件有两种方法来校准电池电压，即全局电芯增益校准和单个电芯增益校准。全局电芯增益校准会计算并应用所有电芯的单个平均增益值，而单个电芯增益校准则会根据每个电芯的情况计算并应用单个增益值。

为了获得最佳精度，TI 建议使用单个电芯增益校准过程来校准电芯电压。为确保最精度，TI 建议采用单个电芯增益校准方法来校准电池电压。

对于这两种方法而言，第一步是相同的：

1. 向电芯电压输入端施加已知的电压（以 mV 为单位）：
 - 在 VC1 引脚和 VSS 引脚之间施加 V_{CELL1}
 - 在 VC2 引脚和 VC1 引脚之间施加 V_{CELL2}
 - 在 VC3 引脚和 VC2 引脚之间施加 V_{CELL3}
 - 在 VC4 引脚和 VC3 引脚之间施加 V_{CELL4}

全局电芯增益校准

1. 如果 $ManufacturerStatus()[CAL] = 0$ ，则向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0x002D 以启用 [CAL] 标志。
2. 向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0xF081 或 0xF082 以在 $ManufacturerData()$ 上启用原始电芯电压输出。
3. 在读取数据之前轮询 $ManufacturerData()$ ，直到 8 位计数器值递增 2。
4. 从 $ManufacturerData()$ 获取电芯电压的 ADC 转换读数：

$ManufacturerData()$ 的 $ADC_{CELL1} = BBbb$

ADC_{CELL1} 是否小于 0x8000？如果是，则使用 ADC_{CELL1} ；否则 $ADC_{CELL1} = -(0xFFFF - BBbb + 0x0001)$ 。

5. 取多个读数的平均值以实现更高的精度。轮询 $ManufacturerData()$ ，直到 ZZ 递增以指示更新的值可用：

$$ADC_{CELL1} = [ADC_{CELL1}(\text{reading } n) + \dots + ADC_{CELL1}(\text{reading } 1)]/n$$

6. 对所有电芯求平均值，用所有电压的平均值来创建单个电芯增益：

$$Cell\ Gain = \frac{V_{cell1} + V_{cell2} + V_{cell3} + V_{cell4}}{ADC_{cell1} + ADC_{cell2} + ADC_{cell3} + ADC_{cell4}} \times 2^{16} \quad (1)$$

7. 将新的 Cell Gain 值写入数据闪存。
8. 重新检查电压读数，如果读数不准确，则重复执行步骤 4 至 8。
9. 如果所有校准都已完成，则向 *ManufacturerAccess()* 发送 0x002D 以清除 [CAL] 标志。

单个电芯增益校准

1. 如果 *ManufacturerStatus()[CAL]* = 0，则向 *ManufacturerAccess()* 发送 0x002D 以启用 [CAL] 标志。
2. 将施加到每个电芯连接处的已知电压转换为十六进制。
3. 使用 0x0341 命令调用 *ManufacturerAccess()*，将每个电芯连接处的已知电压以小端序十六进制格式发送给设备。输入必须采用以下格式：**[设备地址 + 起始地址 + 长度 + 0x0341 命令 + 施加的电池 1 电压 + 施加的电池 2 电压 + 施加的电池 3 电压 + 施加的电池 4 电压]**如果有任何未使用或不打算校准的电芯，则将预期电压输入为 0x0000。

示例：校准所有已知电池电压均为 4000mV (0x0FA0) 的 4S 电池组：

0x0B 0x44 0x0A 0x41 0x03 0xA0 0x0F 0xA0 0x0F 0xA0 0x0F 0xA0 0x0F

4. 重新检查电压读数，如果读数不准确，则重复执行步骤 1 至 3。
5. 如果所有校准都已完成，则向 *ManufacturerAccess()* 发送 0x002D 以清除 [CAL] 标志。

2.2 BAT 电压校准

BAT 电压校准如图 2-2 所示。

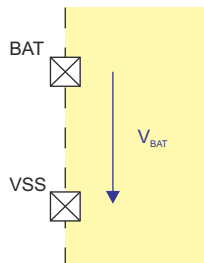


图 2-2. BAT 电压校准

1. 向电压输入端施加已知的电压（以 mV 为单位）：
 - VC4 引脚与 VSS 引脚之间的 VBAT
2. 如果 *ManufacturerStatus()[CAL]* = 0，则向 *ManufacturerAccess()* 发送 0x002D 以启用 [CAL] 标志。
3. 向 *ManufacturerAccess()* 发送 0xF081 或 0xF082 以在 *ManufacturerData()* 上启用原始电芯电压输出。
4. 在读取数据之前轮询 *ManufacturerData()*，直到 8 位计数器值递增 2。
5. 从 *ManufacturerData()* 获取电芯堆电压的 ADC 转换读数：
 - *ManufacturerData()* 的 ADCBAT = GGgg，
6. 取多个读数的平均值以实现更高的精度。轮询 *ManufacturerData()*，直到 ZZ 递增以指示更新的值可用：
 - $ADCBAT = [ADCBAT(\text{reading } n) + \dots + ADCBAT(\text{reading } 1)]/n$
7. 计算增益值：

$$BAT\ Gain = \frac{V_{BAT}}{ADCBAT} \times 2^{16} \quad (2)$$

8. 将新的 BAT Gain 值写入数据闪存。
9. 重新检查电压读数，如果读数不准确，则重复执行步骤 4 至 6。
10. 如果所有校准都已完成，则向 *ManufacturerAccess()* 发送 0x002D 以清除 [CAL] 标志。

2.3 PACK 电压校准

PACK 电压校准如图 2-3 所示。

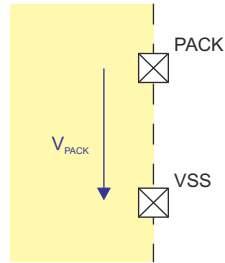


图 2-3. PACK 电压校准

- 向电压输入端施加已知的电压（以 mV 为单位）：
 - 在 PACK 引脚和 VSS 引脚之间施加 V_{PACK}
- 如果 `ManufacturerStatus()[CAL] = 0`，则向 `ManufacturerAccess()` 发送 `0x002D` 以启用 [CAL] 标志。
- 向 `ManufacturerAccess()` 发送 `0xF081` 或 `0xF082` 以在 `ManufacturerData()` 上启用原始电芯电压输出。
- 在读取数据之前轮询 `ManufacturerData()`，直到 8 位计数器值递增 2。
- 从 `ManufacturerData()` 获取电池组电压的 ADC 转换读数：
 - `ManufacturerData()` 的 $ADC_{PACK} = FFff$
- 取多个读数的平均值以实现更高的精度。轮询 `ManufacturerData()`，直到 ZZ 递增以指示更新的值可用：
 - $ADC_{PACK} = [ADC_{PACK}(\text{reading } n) + \dots + ADC_{PACK}(\text{reading } 1)]/n$
- 计算增益值：

$$PACK \text{ Gain} = \frac{V_{PACK}}{ADC_{PACK}} \times 2^{16} \quad (3)$$

- 将新的 PACK Gain 值写入数据闪存。
- 重新检查电压读数，如果读数不准确，则重复执行步骤 4 至 6。
- 如果所有校准都已完成，则向 `ManufacturerAccess()` 发送 `0x002D` 以清除 [CAL] 标志。

2.4 电流校准

图 2-4 展示了电流校准图。

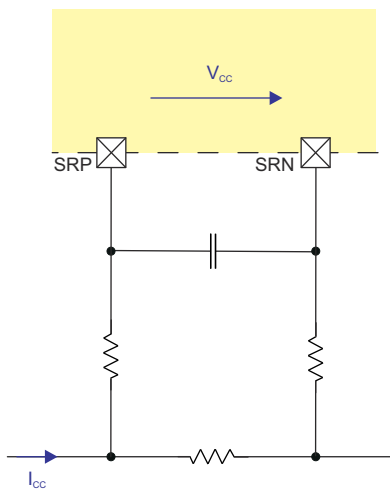


图 2-4. 电流校准

2.4.1 CC 偏移校准

备注

由于该器件硬件的改进，CC 偏移校准不是必需的。只有在不存在电流时观察到电流时，才运行 CC 偏移校准程序。

1. 施加 0mA 的已知电流，并确保没有电流流过连接在 SRP 和 SRN 引脚之间的检测电阻。
2. 在 CC 偏移校准期间，从外部将 SRN 和 SRP 引脚短接在一起，以获得理想结果。
3. 如果 $ManufacturerStatus()[CAL] = 0$ ，则向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0x002D 以启用 [CAL] 标志。
4. 向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0xF081 以在 $ManufacturerData()$ 上启用原始电流输出。
5. 在读取数据之前轮询 $ManufacturerData()$ ，直到 ZZ 递增 2。
6. 从 $ManufacturerData()$ 获取电流的 ADC 转换读数：
 - $ManufacturerData()$ 的 $ADC_{CC} = AAaa$

ADC_{CC} 是否小于 0x8000？如果是，则使用 ADC_{CC} ；否则 $ADC_{CC} = -(0xFFFF - AAaa + 0x0001)$ 。
7. 取多个读数的平均值以实现更高的精度。轮询 $ManufacturerData()$ ，直到 ZZ 递增以指示更新的值可用：
 - $ADC_{CC} = [ADC_{CC}(\text{reading } n) + \dots + ADC_{CC}(\text{reading } 1)]/n$
8. 从数据闪存中读取库伦计数器失调取样数。
9. 计算失调值：
 - $CC \text{ offset} = ADC_{CC} \times (\text{Coulomb Counter Offset Samples})$
10. 将新的 CC Offset 值写入数据闪存。
11. 重新检查电流读数，如果读数不准确，则重复执行步骤 1 至 10。
12. 如果所有校准都已完成，则向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0x002D 以清除 [CAL] 标志。

2.4.2 电路板失调校准

备注

由于该器件硬件的改进，电路板失调校准不是必需的。只有在观察到电路板失调电流时才运行电路板失调校准程序。

1. 确保首先执行失调校准。
2. 施加 0mA 的已知电流，并确保没有电流流过连接在 SRP 和 SRN 引脚之间的检测电阻。
3. 如果 $ManufacturerStatus()[CAL] = 0$ ，则向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0x002D 以启用 [CAL] 标志。
4. 向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0xF081 以在 $ManufacturerData()$ 上启用原始电流输出。
5. 在读取数据之前轮询 $ManufacturerData()$ ，直到 ZZ 递增 2。
6. 从 $ManufacturerData()$ 获取电流的 ADC 转换读数：
 - $ManufacturerData()$ 的 $ADC_{CC} = AAaa$

ADC_{CC} 是否小于 0x8000？如果是，则使用 ADC_{CC} ；否则 $ADC_{CC} = -(0xFFFF - AAaa + 0x0001)$ 。
7. 取多个读数的平均值以实现更高的精度。轮询 $ManufacturerData()$ ，直到 ZZ 递增以指示更新的值可用：
 - $ADC_{CC} = [ADC_{CC}(\text{reading } n) + \dots + ADC_{CC}(\text{reading } 1)]/n$
8. 从数据闪存中读取库伦计数器失调取样数。
9. 计算失调值：
 - $Board \text{ offset} = (ADC_{CC} - CC \text{ Offset}) \times \text{Coulomb Counter Offset Samples}$
10. 将新的电路板失调值写入数据闪存。
11. 重新检查电流读数。如果读数不准确，则重复执行步骤 1 至 10。
12. 如果所有校准都已完成，则向 $ManufacturerAccess()$ 发送 0x002D 以清除 [CAL] 标志。

2.4.3 CC 增益校准

1. 施加已知电流（通常为 1A 至 2A），并确保 ICC 流过连接在 SRP 和 SRN 引脚之间的检测电阻。
 2. 如果 `ManufacturerStatus()[CAL] = 0`，则向 `ManufacturerAccess()` 发送 0x002D 以启用 [CAL] 标志。
 3. 向 `ManufacturerAccess()` 发送 0xF081 以在 `ManufacturerData()` 上启用原始 CC 输出。
 4. 在读取数据之前轮询 `ManufacturerData()`，直到 ZZ 递增 2。
 5. 从 `ManufacturerData()` 获取电流的 ADC 转换读数：
 - `ManufacturerData()` 的 $ADC_{CC} = AAaa$
- ADC_{CC} 是否小于 0x8000？如果是，则使用 ADC_{CC}；否则 $ADC_{CC} = -(0xFFFF - AAaa + 0x0001)$ 。
6. 取多个读数的平均值以实现更高的精度。轮询 `ManufacturerData()`，直到 ZZ 递增以指示更新的值可用：
 - $ADC_{CC} = [ADC_{CC}(\text{reading } n) + \dots + ADC_{CC}(\text{reading } 1)]/n$
 7. 从数据闪存中读取库伦计数器失调取样数。
 8. 计算增益值：

$$CC \text{ Gain} = \frac{I_{CC}}{ADC_{CC} - \frac{Board \text{ Offset} + CC \text{ Offset}}{Coulomb \text{ Counter} \text{ Offset} \text{ Samples}}} \times 2^{16} \quad (4)$$

9. 将新的 CC Gain 值写入数据闪存。
10. 重新检查电流读数。如果读数不准确，则重复执行步骤 1 至 9。
11. 如果所有校准都已完成，则向 `ManufacturerAccess()` 发送 0x002D 以清除 [CAL] 标志。

备注

BQ41xxx 产品系列中不再使用容量增益，不得使用或修改容量增益。

2.5 温度校准

图 2-5 阐释了温度校准。

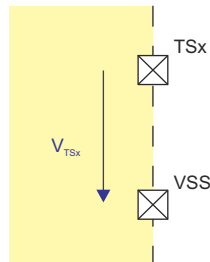


图 2-5. 温度校准

2.5.1 内部温度传感器校准

1. 以 0.1°C 为单位应用已知温度，确保对器件应用温度 $TEMP_{TINT}$ 。
2. 从 Internal Temp Offset 中读取 $TINT \text{ offset}_{old}$ 。
3. 从 `DAStatus2()` 中读取报告的温度：
 - `DAStatus2()` 的 $TINT = AAaa$ 。TINT 是否大于 0？如果是，则 $TINT = AAaa - 2732$ 。
4. 计算温度偏差：

$$TINT \text{ offset} = TEMP_{TINT} - TINT + TINT \text{ offset}_{old} \quad (5)$$

5. 将新的 Internal Temp Offset 值写入数据闪存。
6. 重新检查 `DAStatus2()` 读数。如果读数不准确，则重复执行步骤 1 至 5。

2.5.2 TS1 - TS2 - TS3 - TS4 校准

1. 以 0.1°C 为单位应用已知温度，确保对连接到 TSx 端子的热敏电阻应用温度 $TEMP_{TSx}$ 。“TSx”指 TS1、TS2、TS3 或 TS4，以适用者为准。
2. 从 External x Temp Offset 中读取 $TSx\ offset_{old}$ ，其中 x 为 1、2、3 或 4。
3. 从 DAStatus2() 块中读取相应的温度作为 TSx。
4. 计算温度偏移：

$$TSx\ offset = TEMP_{TSx} - TSx + TSx\ offset_{old} \quad (6)$$

其中 x 为 1、2、3 或 4。

5. 将新的 External x Temp Offset (其中 x 为 1、2、3 或 4) 值写入数据闪存。
6. 重新检查 DAStatus2() 读数。如果读数不准确，则重复执行步骤 1 至 5。

3 参考资料

- 德州仪器 (TI), [BQ41Z50 1 节、2 节、3 节和 4 节锂离子电池组管理器](#), 数据表。
- 德州仪器 (TI), [BQ41Z50 技术参考手册](#), 技术参考手册。
- 德州仪器 (TI), [BQ41Z50 锂离子电池包管理器评估模块 EVM 用户指南](#)。

4 修订历史记录

Changes from Revision * (July 2024) to Revision A (April 2026)

Page

- 将“+”符号添加到“电芯电压校准”部分要点 5 中的 ADCCELL1 值.....4
- 从公式 1 中删除了因子“VCELL1”4
- 新增了[单个电芯增益校准](#)部分.....4
- 将“+J+”添加到“BAT 电压校准”部分第 6 步中的“... “ 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、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