

BQ76925 如何获取最佳电压测量精度

张楚涛 Hugo Zhang

TI BMS 产品技术支持

摘要

BQ76925 是主机（MCU）控制的模拟前端（Analog Front End, AFE），可以支持 3~6 串的电池包。主机可以通过 BQ76925 来测量电流，温度，以及每节电芯的电压。为了提供准确的测量精度，BQ76925 集成了高精度且低温飘的参考电压（voltage reference），以及为每节电芯通道都提供独立的校正参数，包括增益（gain）和零偏（offset）。

本篇文章展示了 BQ76925 的一个易于理解的电压测量模块，以及描述了如果利用校正参数来获得最佳的电压测量精度。同时也提供测试结果和部分参考代码。

目录

1, BQ76925 电压测量模块模块介绍.....	2
2, 易于理解的电压测量系统框图.....	3
2.1, 参考电压模块.....	3
2.2, 多路选通和 Level Shift 模块.....	4
2.3, MCU 端的 ADC 的校准	4
2.4, 电芯电压的计算	4
3, 如何使用 EPROM 里的增益和零偏参数。	4
4, 测试结果.....	6
参考文档.....	7

图

图 1: BQ76925 电压系统框图.....	2
图 2: 每节电芯的增益（gain）和零偏（offset）	3
图 3: BQ76925 的电压测量系统和增益/零偏参数的简化框图.....	3

1, BQ76925 电压测量模块模块介绍

BQ76925 的电压测量模块包括:

- (1), 可供 MCU 的 ADC 使用的高精度电压参考源, 如下图的绿色框。
- (2), 多通道电芯电压 level shift 及放大模块, 如下图的红色框。Level shift 模块把带有共模电压的每节电芯的差分电压转换成对地的电压, 然后经过一个运算放大器再缩小 0.3/0.6 倍。通过 level shift 及放大, 即可直接提供给 MCU 的 ADC 进行采样。

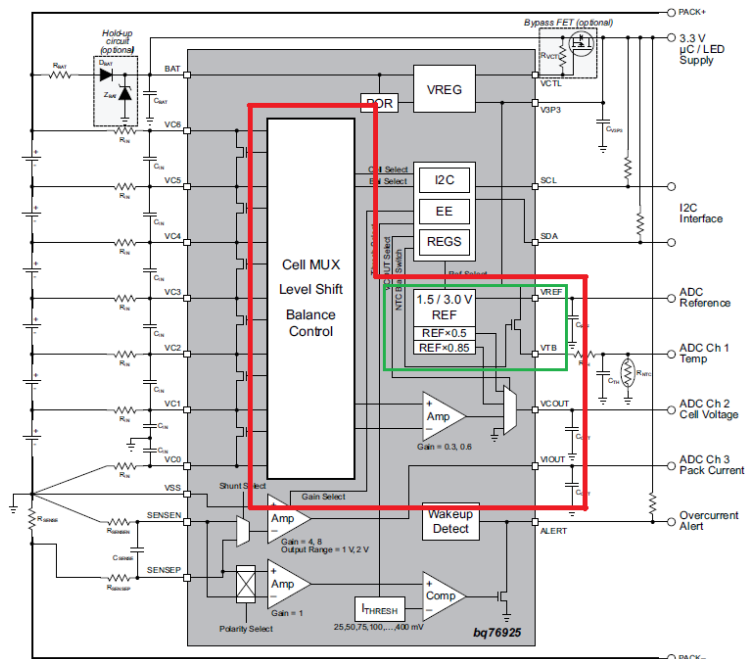


图 1: BQ76925 电压系统框图

BQ76925 提供的参考电压精度是 $\pm 0.1\%$ （校正后），温漂是 $\pm 40\text{PPM}/^\circ\text{C}$ 。这些指标通常都比 MCU 集成的参考电压要好。BQ76925 还给每节电芯通道都提供独立的校正参数，包括增益（gain）和零偏（offset）。这些校正参数在芯片生产过程中测量并已存放在芯片的 EPROM 中。所以 BQ76925 不需要 PCM 或电池包生产过程中进行电压校正的。

0x10	VREF_CAL	EEPROM	VREF_OFFSET_CORR				VREF_GAIN_CORR		
0x11	VC1_CAL	EEPROM	VC1_OFFSET_CORR				VC1_GAIN_CORR		
0x12	VC2_CAL	EEPROM	VC2_OFFSET_CORR				VC2_GAIN_CORR		
0x13	VC3_CAL	EEPROM	VC3_OFFSET_CORR				VC3_GAIN_CORR		
0x14	VC4_CAL	EEPROM	VC4_OFFSET_CORR				VC4_GAIN_CORR		
0x15	VC5_CAL	EEPROM	VC5_OFFSET_CORR				VC5_GAIN_CORR		
0x16	VC6_CAL	EEPROM	VC6_OFFSET_CORR				VC6_GAIN_CORR		
0x17	VC_CAL_EXT_1	EEPROM	VC1_OC_4	VC1_GC_4	VC2_OC_4	VC2_GC_4			
0x18	VC_CAL_EXT_2	EEPROM	VC3_OC_4	VC3_GC_4	VC4_OC_4	VC4_GC_4	VC5_OC_4	VC5_GC_4	VC6_OC_4
0x10 - 0x1A	Reserved	EEPROM							
0x1B	VREF_CAL_EXT	EEPROM					1	VREF_OC_5	VREF_OC_4
0x1C - 0x1F	Reserved	EEPROM							

图 2：每节电芯的增益（gain）和零偏（offset）

而且如果 MCU 使用 BQ76925 提供的参考电压作为 ADC 的参考电压，那 BQ76925 还提供了一种通过在 VCOUT 管脚输出 $0.85 \cdot V_{REF}$ 和 $0.5 \cdot V_{REF}$ 来校准 MCU 的 ADC 的方法，详见下面第 2.3 节的介绍。

2，易于理解的电压测量系统框图

为了更好的理解 BQ76925 的电压测量系统和增益/零偏参数，我们把它整理成如下的简化的框图。在下面的框图里，我们认为每一个功能模块都是理想的，然后串联上一个误差的模块。

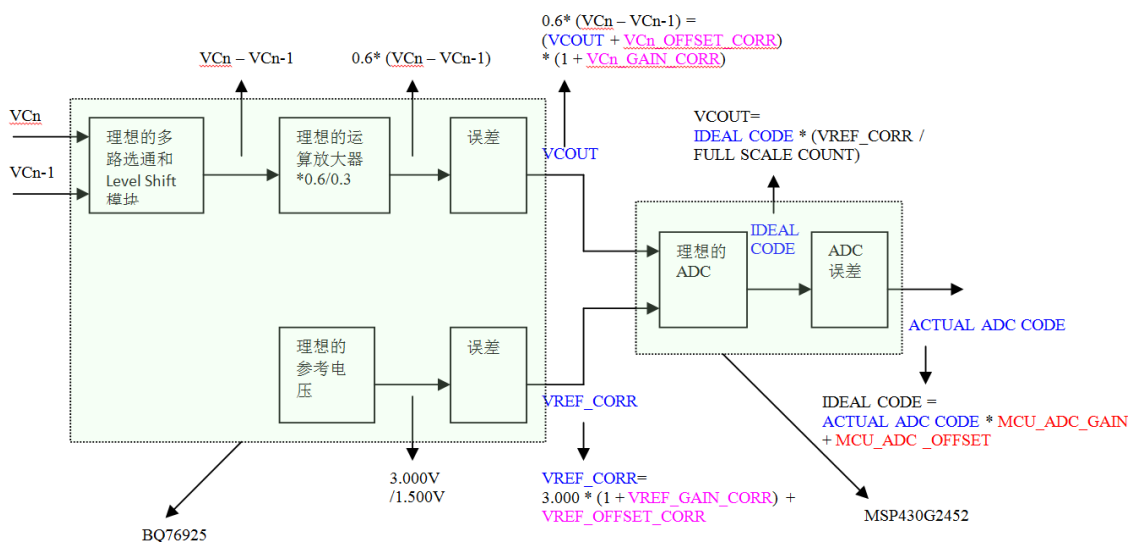


图 3：BQ76925 的电压测量系统和增益/零偏参数的简化框图

2.1，参考电压模块

参考电压（Reference）模块可以理解成一个理想的参考电压（这里用 3.000V 作为例子），然后串联上一个误差模块。所以实际输出到 VREF 管脚的电压是：

公式 1: $V_{REF_CORR} = 3.000 \cdot (1 + V_{REF_GAIN_CORR}) + V_{REF_OFFSET_CORR}$

其中，VREF_GAIN_CORR 和 VREF_OFFSET_CORR 都是从 EPROM 里读到的，是已知的。VREF_GAIN_CORR 的单位是 0.001（即 0.1%），VREF_OFFSET_CORR 的单位是 mV。

2.2, 多路选通和 Level Shift 模块

电芯电压的多路选通和 Level Shift 模块可以理解成一个理想的多路选通和理想的 Level Shift 电路，串联上一个理想的运算放大器（这里以 0.6 倍增益为例），最后再串联上一个误差模块。所以在输出 VCOUT 和输入 VCn - VCn-1 之间的电压关系是：

$$\text{公式 2: } 0.6 * (VCn - VCn-1) = (VCOUT + VCn_OFFSET_CORR) * (1 + VCn_GAIN_CORR)$$

其中 VCn_OFFSET_CORR 和 VCn_GAIN_CORR 是从 EPROM 里读到的，是已知的。VCn_GAIN_CORR 的单位是 0.001（即 0.1%），VCn_OFFSET_CORR 的单位是 mV。

2.3, MCU 端的 ADC 的校准

这里提到的增益和零偏是指 MCU 的 ADC 的增益和零偏，而不是只 BQ76925 的。MCU 的 ADC 模块也可以理解成是一个理想的 ADC，串联上一个误差模块。为了校准 MCU 的 ADC 的增益和零偏，硬件电路需要把 BQ76925 的 VREF 作为 MCU 的 ADC 的参考电压。且需要下面两步：

第一步：通过配置寄存器是的 VCOUT 管脚输出 $0.85 * VREF$ 的电压。让 MCU 进行一次 ADC 转换，并记录其结果 CODE1。那么我们可以得到：

$$0.85 * \text{FULL SCALE COUNT} = \text{CODE1} * MCU_ADC_GAIN + MCU_ADC_OFFSET$$

第二步：通过配置寄存器是的 VCOUT 管脚输出 $0.5 * VREF$ 的电压。让 MCU 进行一次 ADC 转换，并记录其结果 CODE2。那么我们可以得到：

$$0.5 * \text{FULL SCALE COUNT} = \text{CODE2} * MCU_ADC_GAIN + MCU_ADC_OFFSET$$

通过上面两个式子，我们就可以计算 MCU_ADC_GAIN 和 MCU_ADC_OFFSET。再根据 MCU 获得 ADC 结果（Actual ADC Code），我们可以通过下面两个式子来计算出 VCOUT：

$$\text{公式 3: } \text{IDEAL CODE} = \text{Actual ADC Code} * MCU_ADC_GAIN + MCU_ADC_OFFSET$$

$$\text{公式 4: } VCOUT = \text{IDEAL CODE} * (VREF_CORR / \text{FULL SCALE COUNT})$$

2.4, 电芯电压的计算

通过上面的电压测量系统的简化框图，我们可以获得高精度的电芯电压，即 VCn - VCn-1：

- （1），根据 MCU 获得 ADC 结果（Actual ADC Code），通过公式 1，公式 3 和公式 4，算得 VCOUT。
- （2），根据 VCOUT，通过公式 2，算得 VCn - VCn-1。

3, 如何使用 EPROM 里的增益和零偏参数。

BQ76925 的增益和零偏参数是以 5-bit 或 6-bit 的带符号的二进制补码的形式分散地存储在 EPROM 里。从 EPROM 读到增益和零偏参数后，需要经过处理，转换成 8-bit 的二进制补码的数据，以方便 MCU 使用和计算。下面的参考源代码即是实现这个功能。

```

for (index = 0; index < 7; index++) {
    if (i2c_read( VREF_CAL | index, &i2c_read_struct)) error_trap();

    offset_corr[index] = i2c_read_struct.data >> 4;

    gain_corr[index] = i2c_read_struct.data & 0x0F;
}

if (i2c_read(VREF_CAL_EXT, &i2c_read_struct)) error_trap();
offset_corr[0] |= (((i2c_read_struct.data & 0x06) << 3) ^ 0x20) - 0x20;
gain_corr[0]  |= (((i2c_read_struct.data & 0x01) << 4) ^ 0x10) - 0x10;

if (i2c_read(VC_CAL_EXT_1, &i2c_read_struct)) error_trap();
offset_corr[1] |= (((i2c_read_struct.data & 0x80) >> 3) ^ 0x10) - 0x10;
gain_corr[1]  |= (((i2c_read_struct.data & 0x40) >> 2) ^ 0x10) - 0x10;
offset_corr[2] |= (((i2c_read_struct.data & 0x20) >> 1) ^ 0x10) - 0x10;
gain_corr[2]  |= (((i2c_read_struct.data & 0x10)) ^ 0x10) - 0x10;

if (i2c_read(VC_CAL_EXT_2, &i2c_read_struct)) error_trap();
offset_corr[3] |= (((i2c_read_struct.data & 0x80) >> 3) ^ 0x10) - 0x10;
gain_corr[3]  |= (((i2c_read_struct.data & 0x40) >> 2) ^ 0x10) - 0x10;
offset_corr[4] |= (((i2c_read_struct.data & 0x20) >> 1) ^ 0x10) - 0x10;
gain_corr[4]  |= (((i2c_read_struct.data & 0x10)) ^ 0x10) - 0x10;
offset_corr[5] |= (((i2c_read_struct.data & 0x08) << 1) ^ 0x10) - 0x10;
gain_corr[5]  |= (((i2c_read_struct.data & 0x04) << 2) ^ 0x10) - 0x10;

```

```
offset_corr[6] |= (((i2c_read_struct.data & 0x02) << 3) ^ 0x10) - 0x10;
```

```
gain_corr[6] |= (((i2c_read_struct.data & 0x01) << 4) ^ 0x10) - 0
```

例如从 BQ76925 读到的原始的 5-bit 或 6-bit 的增益和零偏数据如下表 1，每个 bit 的意义请参考图 1。

0x10	VREF_CAL	0x60
0x11	VC1_CAL	0x12
0x12	VC2_CAL	0x00
0x13	VC3_CAL	0x20
0x14	VC4_CAL	0x1F
0x15	VC5_CAL	0x0E
0x16	VC6_CAL	0x4C
0x17	VC_CAL_EXT_1	0x04
0x18	VC_CAL_EXT_2	0x15
0x1B	VREF_CAL_EXT	0x08

表 1: 原始的 5-bit 或 6-bit 的增益和零偏数据

以第六节电芯为例，经过组合后，零偏的原始的 5-bit 二进制补码是 00100，增益的原始的 5-bit 二进制补码是 11100。那么经过处理后，零偏的 8-bit 数据是 0x04，即第六节电芯的零偏校准数据是+4mV。增益的 8-bit 数据是 0xFC，即第六节电芯的增益校准数据是-0.004。所以第六节电芯的实际增益是 $1 + (-0.004) = 0.996$ 。

4, 测试结果

下面的测试结果是基于 MCU 10-bit ADC，VREF 设成 3.000V，运算放大器的增益设成 0.6。下面的表格是用高精度万用表（如 Agilent 34401A）来测量每节电芯的实际电压，与 MCU 通过 ADC 算得的电压进行比较。我们可以看到，经过上述校准机制后，我们可以获得比较好的测量精度。

Cell	Measured Value (mV)	ADC Result with Correction (mV)	Delta (mV)	ADC Result without Correction (mV)	Delta (mV)
1	3642.3	3640	2.3	3632	10.3
2	3643.3	3645	-1.7	3645	-1.7
3	3639.0	3637	2.0	3635	4.0
4	3643.7	3642	1.7	3646	-2.3
5	3617.4	3613	4.4	3622	-4.6
6	3660.6	3657	3.6	3668	-7.4

表 2: 测试结果对比表

参考文档

bq76925 Host-Controlled Analog Front End for 3-Series to 6-Series Cell Li-Ion/Li-Polymer Battery Protection and Gas Gauging Applications datasheet (Rev. D), <http://www.ti.com/lit/gpn/bq76925>

bq76925EVM Evaluation Module, <http://www.ti.com/lit/pdf/slue514>

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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](http://www.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 © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司