

## 电量计 FCC 更新机制及 FCC 偏小问题分析方法

朱明武 (Mingmo Zhu)

TI

### ABSTRACT

客户经常会问电量计 FCC 是怎么更新的，为何有的电池 FCC 与标称容量相比偏小。本文从 FCC 定义出发，分析了 FCC 影响因子，以 [BQ40Z50-R2](#) 为例用实际充放电案例分析 True FCC 和 Filtered FCC 更新机制。对于客户常常关心的 FCC 偏小问题，提供分析方法和优化方法，以帮助优化 FCC 表现。

### Contents

<b>1. FCC 定义及影响因子 .....</b>	<b>2</b>
<b>2. FCC 更新机制 .....</b>	<b>2</b>
2.1. True FCC 更新机制 .....	3
2.2. Filtered FCC 更新机制 .....	3
2.3. True FCC 和 Filtered FCC 更新案例分析 .....	3
<b>3. FCC 偏小问题分析及优化方法 .....</b>	<b>6</b>
3.1. FCC 偏小问题背景 .....	6
3.2. FCC 偏小问题分析方法 .....	6
3.2.1. 分析电池实际放电容量 .....	6
3.2.2. 分析 True FCC 组成部分 .....	8
3.3. 优化方法 .....	9
<b>4. 总结 .....</b>	<b>10</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>10</b>

### Figures

<b>Figure 1. BQ40Z50-R2 FCC &amp; True FCC 更新案例 .....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 2. 对比分析 FCC 与电池实际放电容量 .....</b>	<b>7</b>
<b>Figure 3. 整个放电过程的总容量 .....</b>	<b>7</b>
<b>Figure 4. Term Min Cell V 决定真实 FCC 容量范围 .....</b>	<b>8</b>

### Tables

<b>Table 1. Reset or Wakeup 时 FCC 组成分析 .....</b>	<b>8</b>
<b>Table 2. BQ40Z50 仿真负载模型 Load Select / Load Mode .....</b>	<b>9</b>

## 1. FCC 定义及影响因子

电池出厂通常会在铭牌或规格书注明其标称容量 **Design Capacity (or Nominal Capacity)**。该容量是指在常温下按指定电流（比如 **0.2C**）从满充电压开始恒流放电到指定截止电压累计放出来的电量。锂电池的化学特性决定了锂电池在不同温度、不同负载电流、不同老化程度下能放出来的电量是不一样的，不会一直等于 **Design Capacity**。而且各个产品系统关机电压不同，所以电池的放电截止电压也不尽相同。

因此我们需要定义一组相对的概念：**RSOC = 100%** 定义为充满，**RSOC = 0%** 定义为电池电压降到系统关机电压 **Terminate Voltage**，而不是电池过放保护；剩余容量(**Remaining Capacity, RM**)定义为从当前时刻开始放电到 **Terminate Voltage** 累计放出的电量；满充容量(**Full Charge Capacity, FCC**)定义为从满充开始放电到 **Terminate Voltage** 累计放出的电量。**FCC** 不一定等于电池出厂的标称容量，**FCC** 是相对的、变化的。

阻抗跟踪(**Impedance Track™**) 电量算法，基于锂电池电化学特性、动态学习跟踪电池阻抗、结合负载变化来仿真计算 **RM** 和 **FCC**。仿真计算关系式如下：

$$FCC = Qstart + PassedCharge + RM \quad \text{公式(1)}$$

$$Qstart = (DOD_0 - DODatEOC) \times Qmax \quad \text{公式(2)}$$

$$RM = (DODfinal - DODpresent) \times Qmax \quad \text{公式(3)}$$

$$DODpresent = DOD_0 + \frac{PassedCharge}{Qmax} \quad \text{公式(4)}$$

$$DODfinal = f\{DODpresent; I; R; T; Qmax; OCV; TermVoltage\} \quad \text{公式(5)}$$

从上面关系式可知 **FCC** 影响因子包括仿真负载 *I*、电池阻抗 *R*、温度 *T*、*Qmax*、*OCV*、*TermVoltage*、*DOD0*、*DODatEOC*、*PassedCharge* 等。

## 2. FCC 更新机制

电量计一般可看到三个 **FCC**：**FullChargeCapacity()**、**Filtered FCC** 和 **True FCC**。以 [BQ40Z50-R2](#) 为例，**FullChargeCapacity()** 用标准 **SMBUS** 指令 **0x10** 读取，**Filtered FCC** 用扩展 **SMSBUS** 指令 **0x0078** 读取，**True FCC** 用扩展 **SMSBUS** 指令 **0x0073** 读取。

由于锂电池的 **FCC** 会随着温度变化或负载电流变化而变化，为了达到更好的用户体验，往往需要电量计或主机做平滑处理。

在电量计里平滑后的数据叫 **Filtered** 或者 **Smoothed**，相对应的平滑前的数据叫 **True** 或 **Unfiltered**。不管有没有设置开启平滑功能，电量计都会同时计算 **Filtered** 和 **True** 的数据。当设置开启平滑功能 **Smooth Enable**，则标准 **FullChargeCapacity()** 指令读到的就是 **Filtered FCC**；否则没有开启平滑的话就返回 **True FCC**。

## 2.1. True FCC 更新机制

以 [BQ40Z50-R2](#) 为例，阻抗跟踪(Impedance Track™) 电量计 True FCC 仿真更新机制如下：

- (1). 复位 Reset 时 RM, FCC 重新仿真更新。
- (2). 每当 Qmax 更新时 RM, FCC 重新仿真更新。Qmax 更新一般发生在当 OCV 电压足够稳定( $dV / dt < 4 \mu V/s$ )或者静置超过 5 小时的时刻。
- (3). 每当 Ra 更新时 RM, FCC 重新仿真更新。Ra 更新发生在放电过程中 15 个阻抗表格点(Grid Point)。
- (4). 每当退出 Relax Mode (即充电开始、或放电开始时) RM, FCC 重新仿真更新。
- (5). 每当充电充满截止时 RM, FCC 重新仿真更新。
- (6). 静置过程中每 5 小时 RM, FCC 重新仿真更新。
- (7). 每当温度变化达到 Delta T 5°C 时 RM, FCC 重新仿真更新。

## 2.2. Filtered FCC 更新机制

以 [BQ40Z50-R2](#) 为例，Filtered FCC 更新机制如下：

- (1). 当复位 Reset 时 Filtered FCC 同步到 True FCC。
- (2). 当 TrueRemCap  $\geq$  True FCC 时 Filtered FCC 同步到 True FCC。
- (3). 当 TrueRemCap  $\leq$  0 时 Filtered FCC 同步到 True FCC。
- (4). 静置过程中当温度变化达到 Delta T 5°C 时 Filtered FCC 同步到 True FCC。

这样的话在放电过程 Filtered FCC 就可保持不变。

## 2.3. True FCC 和 Filtered FCC 更新案例分析

下面是以 BQ40Z50-R2 实际充放电案例来分析以上 Filtered FCC 和 True FCC 更新节点。

这个电池包是 Design Capacity 7410mAh。开启了 Smooth 平滑功能，FullChargeCapacity()显示 Filtered FCC。

BQ40Z50-R2 DF>>Gas Gauging>>IT Cfg>>Term Voltage = 6000mV

BQ40Z50-R2 DF>>Gas Gauging>>IT Cfg>>Term Min Cell V= 3000mV

BQ40Z50-R2 DF>>Settings>>Configuration>>IT Gauging Configuration [CELL\_TERM] = 1

这个电池从满充 4.35V 开始用 0.5C 恒流放空 3.0V→静置 1 小时→用 0.5C 充到 3.9V→静置 6 小时→用 0.5C 充到 4.35V→静置，图 1 记录了这个过程的 Current, 电压最小的电芯电压 CellVolt1, PassedCharge (DOD0 Passed Q), FCC (FullChgCap), True FCC (TrueFullChgQ)等寄存器信息。

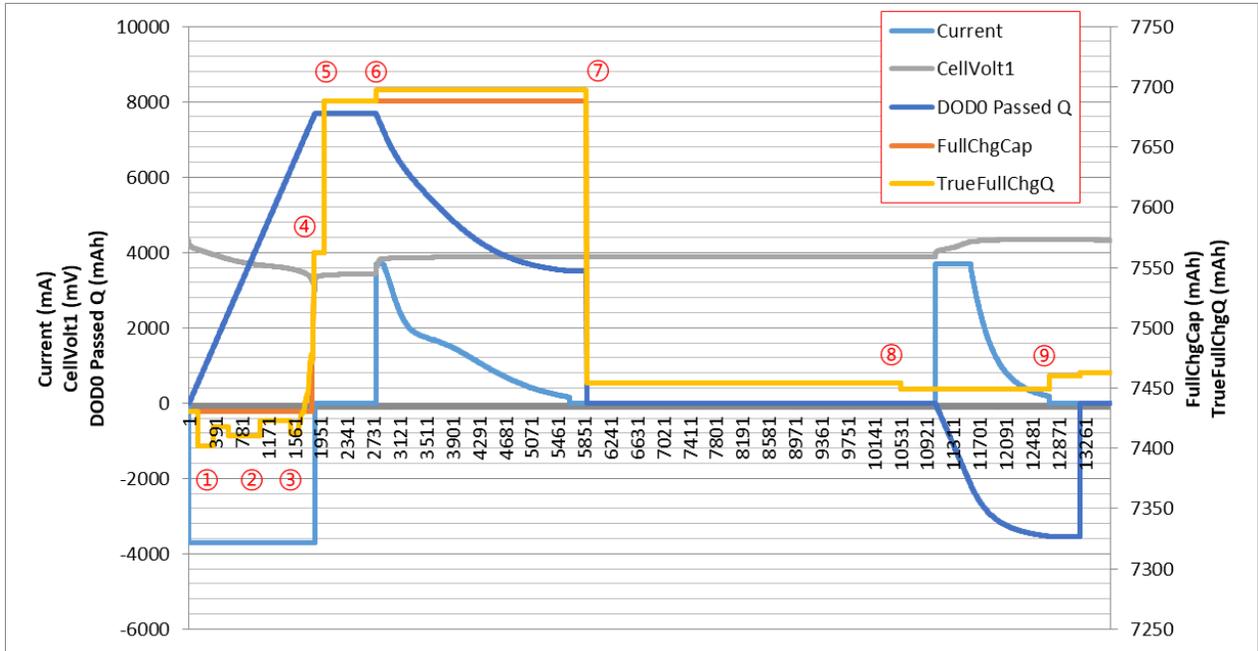


Figure 1. BQ40Z50-R2 FCC & True FCC 更新案例

下面是对图中带圆圈数字这 9 个关键的 Filtered FCC & True FCC 更新点进行分析。

① PackGrid 从 1 到 2, Grid point 更新即 Ra table 更新, 引起 True FCC 重新仿真。后面放电过程中 PackGrid 每次变化都会引起 True FCC 重新仿真。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7402 = -23+544+6881。Log 数据如下:

L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH		
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOCQMax1	QMax2	
133	24.9	-3711	93	6921	7431	4076	4084	6918	-23	7431	22.5	1000	1000	1	772	772		536	800	816	8467	8449
134	24.9	-3711	93	6917	7431	4075	4083	6914	-23	7431	22.5	1000	1000	1	772	772		540	800	816	8467	8449
135	25	-3711	93	6913	7431	4076	4085	6881	-23	7402	24.9	1000	1000	2	772	772		544	800	816	8467	8449
136	25	-3710	93	6909	7431	4074	4082	6877	-23	7402	24.9	1000	1000	2	772	772		548	800	816	8467	8449

② 这个案例电量计参数开启了 Fast Scale 功能 ([RSOC\_CONV]=1), 当 RSOC ≤ Fast Scale Start SOC=10%时 Fast Scale 启动, 增加仿真计算次数, 每隔 30s 做一次仿真, True FCC 重新仿真。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7421 = -23+6699+745。Log 数据如下:

L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH		
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOCQMax1	QMax2	
1625	29.2	-3711	10	752	7431	3513	3530	744	-23	7412	28.7	1000	1000	9	772	772		6691	800	816	8467	8449
1626	29.1	-3711	10	748	7431	3513	3530	740	-23	7412	28.7	1000	1000	9	772	772		6695	800	816	8467	8449
1627	29.2	-3711	10	744	7431	3512	3530	745	-23	7421	29.1	1188	1020	9	772	772		6699	800	816	8467	8449
1628	29.1	-3711	10	740	7431	3511	3528	741	-23	7421	29.1	1188	1020	9	772	772		6703	800	816	8467	8449

③ TrueRM ≤ 0, TrueFCC 重新仿真, FCC 与 True FCC 同步。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7478 = -23+7500+1。Log 数据如下:

L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH		
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOCQMax1	QMax2	
1818	30.8	-3711	0	10	7431	3284	3316	13	-23	7478	30.7	991	807	12	772	772		7488	800	816	8467	8449
1819	30.8	-3712	0	7	7431	3280	3313	9	-23	7478	30.7	991	807	12	772	772		7492	800	816	8467	8449
1820	30.8	-3711	0	4	7431	3277	3310	5	-23	7478	30.7	991	807	12	772	772		7496	800	816	8467	8449
1821	30.8	-3712	0	2	7431	3274	3306	1	-23	7478	30.7	991	807	12	772	772		7500	800	816	8467	8449
1822	30.8	-3712	0	0	7478	3270	3303	-10	-23	7471	30.8	1000	815	12	772	772		7504	800	816	8467	8449

④ Fast Scale, 每隔 30s, True FCC 重新仿真。TrueRM <=0, FCC 与 True FCC 同步。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7562 = -23+7661-76。TrueRM -76 表示过放容量, 即电芯电压降到 Term Min Cell V 以下后继续放电即被示为过放容量。Log 数据如下:

	C	L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	
1	ElapsedTime	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOC
1859	04:48.0	31.6	-3712	0	0	7547	3070	3113	-87	-23	7547	31.4	791	649	13	772	772	7657	800	816	
1860	04:52.0	31.6	-3711	0	0	7562	3061	3105	-76	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7661	800	816	
1861	04:56.0	31.7	-3711	0	0	7562	3053	3097	-80	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7665	800	816	
1862	05:00.0	31.7	-3711	0	0	7562	3043	3089	-84	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7669	800	816	
1863	05:04.0	31.7	-3712	0	0	7562	3034	3080	-88	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7674	800	816	
1864	05:08.0	31.7	-3711	0	0	7562	3024	3071	-92	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7678	800	816	
1865	05:12.0	31.7	-3712	0	0	7562	3013	3062	-97	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7682	800	816	
1866	05:16.0	31.7	-3711	0	0	7562	3002	3052	-101	-23	7562	31.6	752	622	13	772	772	7686	800	816	
1867	05:20.0	31.8	0	0	0	7562	3187	3221	-103	-23	7562	31.8	806	667	13	772	772	7688	800	816	
1868	05:24.0	31.8	0	0	0	7562	3231	3256	-103	-23	7562	31.8	827	667	13	772	772	7688	800	816	

⑤ 温度变化超过 5 度, True FCC 重新仿真。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7688 = -23+7688+23。Log 数据如下:

	L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH	
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOC	QMax1	QMax2
2000	26.8	0	0	0	7562	3392	3406	-103	-23	7562	31.8	827	667	13	772	772	7688	800	816	8467	8449	
2001	26.8	0	0	0	7562	3392	3406	-103	-23	7562	31.8	827	667	13	772	772	7688	800	816	8467	8449	
2002	26.8	0	0	0	7562	3392	3406	23	-23	7688	26.7	827	667	13	772	772	7688	800	816	8467	8449	
2003	26.7	0	0	0	7688	3392	3406	23	-23	7688	26.7	827	667	13	772	772	7688	800	816	8467	8449	

⑥ 退出 Relax Mode 开始充电, True FCC 重新仿真。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7697 = -10+7685+22。Log 数据如下:

	L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH	
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOC	QMax1	QMax2
2767	23.8	0	0	0	7688	3440	3453	23	-23	7688	26.7	827	667	13	772	772	7688	800	816	8467	8449	
2768	23.8	0	0	0	7688	3440	3453	23	-23	7688	26.7	827	667	13	772	772	7688	800	816	8467	8449	
2769	23.8	3706	0	25	7688	3548	3554	22	-10	7697	23.8	827	667	13	772	772	7685	784	792	8467	8449	
2770	23.8	3707	0	29	7688	3560	3566	27	-10	7697	23.8	827	667	13	772	772	7680	784	792	8467	8449	

⑦ 充电停止后进入 Relax mode 约 30 分钟, 电量计开始采 OCV, 更新 DOD0, 这个时候满足 Qmax 更新条件就更新 Qmax, 引发 True FCC 重新仿真。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7454 = 3495+0+3959。Log 数据如下:

	L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH	
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOC	QMax1	QMax2
5883	24	0	55	4197	7688	3888	3888	4200	-10	7697	23.8	1000	1000	13	772	772	3507	784	792	8467	8449	
5884	24	0	55	4197	7688	3888	3888	4200	-10	7697	23.8	1000	1000	13	772	772	3507	784	792	8467	8449	
5885	24	0	55	4069	7454	3888	3888	3959	3495	7454	24	1000	1000	13	7553	7563	0	784	792	8472	8458	
5886	24	0	55	4068	7454	3888	3888	3959	3495	7454	24	1000	1000	13	7553	7563	0	784	792	8472	8458	

⑧ 在 Relax mode 每 5 小时更新 DOD0, True FCC 重新仿真。True FCC = InitialQ + PassedQ + TrueRemQ, 7449 = 3509+0+3940。Log 数据如下:

	C	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH	
1	ElapsedT	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOC	QMax1	QMax2
10532	43:00.0	0	53	3960	7454	3884	3884	3961	3495	7454	24	1000	1000	13	7553	7563	-2	784	792	8472	8458	
10533	43:04.0	0	53	3960	7454	3883	3884	3961	3495	7454	24	1000	1000	13	7553	7563	-2	784	792	8472	8458	
10534	43:08.0	0	53	3957	7449	3884	3884	3940	3509	7449	24.5	1000	1000	13	7578	7589	0	784	792	8472	8458	
10535	43:12.0	0	53	3957	7449	3884	3884	3940	3509	7449	24.5	1000	1000	13	7578	7589	0	784	792	8472	8458	

⑨ 有效充满时(ChargingStatus[VCT]=1), True FCC 重新仿真。但由于参数配置 SBS Gauging Configuration[CSYNC] = 1, 所以 True RM 被强制同步到 True FCC。充满时 Filtered RM/ Filtered FCC 也同步到 True RM/ True FCC。Log 数据如下:

	L	N	Q	S	T	AV	AW	BY	CA	CC	CE	CG	CH	CO	CV	CW	CZ	DC	DD	DG	DH	
1	Temp	Current	RSOC	RemCap	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	TrueRemQ	InitialQ	TrueFullChgQ	T_sim	RaScale1	RaScale2	PackGrid	DOD0_1	DOD0_2	DOD0	Passed Q	DODEOC	DODEOC	QMax1	QMax2
12738	23.9	178	99	7374	7449	4346	4343	7477	3509	7449	24.5	1000	1000	13	7578	7589	-3537	768	792	8472	8458	
12739	23.9	182	99	7374	7449	4346	4343	7477	3509	7449	24.5	1000	1000	13	7578	7589	-3537	768	792	8472	8458	
12740	23.9	138	100		7449	4349	4346	7460	3513	7460	23.9	1000	1000	13	7578	7589	-3537	736	784	8472	8458	
12741	23.9	0	100	7460	7460	4341	4339	7460	3513	7460	23.9	1000	1000	13	7578	7589	-3537	736	784	8472	8458	

## 3. FCC 偏小问题分析及优化方法

### 3.1. FCC 偏小问题背景

在电池产品实际使用中，用户通常只关注 RSOC，很少关心 FCC。大家对 FCC 的问题集中在 FCC 偏小问题，比如有时候客户说电量计报的 FCC 比标称容量 Design Capacity 小，有时候客户说电量计报的 FCC 比实际放电容量小。

首先，FCC 与 Design Capacity 定义不同，FCC 比 Design Capacity 大或小都是有可能的。Design Capacity 一般是在 25°C 下、0.2C 放电电流、放到 Cut off 电压的电量。如果 FCC 在低温放电或低温存储，或者放电电流比 0.2C 大，或者截止电压比电芯 cut off 电压高，那 FCC 都有可能比 Design Capacity 小。

其次，由于 FCC 在开始放电前、还没放电结束时就需要预报，所以 FCC 需要依赖一定的仿真条件来对容量的仿真预估，不能等到放电结束才告诉大家容量是多少。如果用来仿真的条件与实际放电的条件不同，那就可能导致电量计预报的 FCC 比实际放电容量小。

### 3.2. FCC 偏小问题分析方法

下面我们结合案例讲解如何分析 FCC 偏小问题，找出偏小原因，确认偏小是否合理。

#### 3.2.1. 分析电池实际放电容量

由于电池一致性等原因，电池本身容量会有偏差，有些电池本身容量趋近于出厂的 Minimum Capacity，远离 Nominal Capacity，从而导致 FCC 比 Design Capacity (Nominal Capacity) 小。

我们可以通过电流积分来检查电池放电容量大小。有的客户用老化柜对电池充放电时老化柜会对电流积分得到放出的电量。但为了避免老化柜电流精度与电量计电流精度差异引入额外误差，所以推荐的做法是用校准后的电量计电流来积分，计算放出电量。

电流积分的起始点是满充后开始放电的时刻。电流积分的终点是电池电压降到 Terminate Voltage 的时刻。要注意，（1）电流积分的终点不一定是老化柜停止放电的时刻，因为有时候老化柜的停止放电电压比 Terminate Voltage 设得低很多；（2）如果是多串电量计，还要考虑参数配置是以 PACK 总电压为截止还是以单节电芯 CELL 电压为截止，比如 BQ40Z50-R2 的 DF>>Settings>>Configuration>>IT Gauging Configuration [CELL\_TERM] = 0 表示以总电压为截止，= 1 表示以最小电芯电压为截止。若 [CELL\_TERM] = 1 则电流积分的终点是最小电芯电压降到 Term Min Cell V 的时刻。

电流积分的方法一是用放电电流乘以时间进行积分得到放出电量。

电流积分的方法二是直接读取电量计的 PassedCharge 寄存器获得放出电量。

下面是一个 BQ40Z50-R2 的案例。客户反馈有一个电池实际放出电量 4606mAh，但电量计上报 FCC=4483mAh，FCC 偏小。检查放电数据 log，提取电流 Current, FCC (FullChgCap), PassedCharge (DOD0 Passed Q), 电芯电压 CellVlt 等寄存器信息，如图 2 所示。

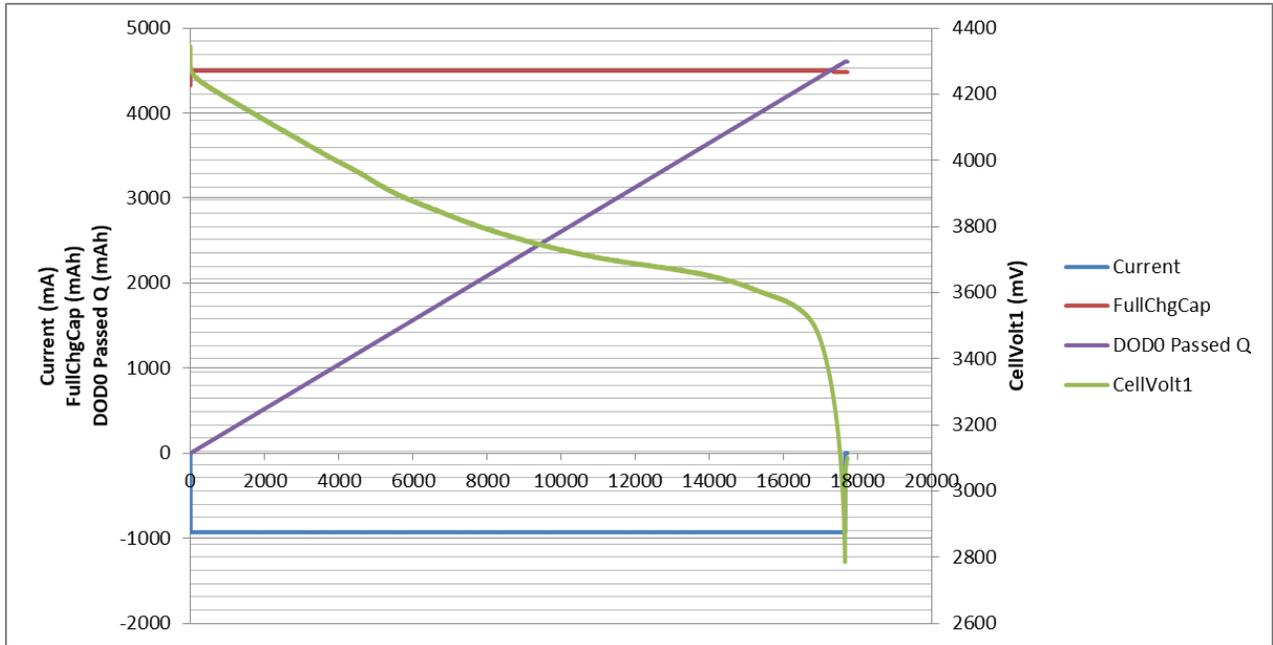


Figure 2. 对比分析 FCC 与电池实际放电容量

发现客户反馈的 4606mAh 是整个放电过程的总容量，这个案例放电一直放到电芯过放保护才停止，如图 3 log 数据第 12775 行所示。但这不是 FCC 定义的容量。

	A	B	C	D	E	F	G	I
1	ElapsedTime	ElapsedTime	Voltage	Current	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	DODO Passed Q
12771	33090.032	17658.016	5848	-930	4483	2811	3035	4604
12772	33091.329	17659.313	5840	-930	4483	2803	3033	4605
12773	33092.594	17660.578	5832	-930	4483	2796	3031	4605
12774	33094.172	17662.156	5819	-930	4483	2786	3028	4606
12775	33095.469	17663.453	5895	-710	4483	2917	3158	4606
12776	33096.735	17664.719	6180	0	4483	2995	3212	4606

Figure 3. 整个放电过程的总容量

检查 BQ40Z50-R2 参数配置:

BQ40Z50-R2 DF>>Gas Gauging>>IT Cfg>>Term Voltage = 6400mV

BQ40Z50-R2 DF>>Gas Gauging>>IT Cfg>>Term Min Cell V= 3200mV

BQ40Z50-R2 DF>>Settings>>Configuration>>IT Gauging Configuration [CELL\_TERM] = 1

根据参数配置[CELL\_TERM] = 1, FCC 电流积分的终点是最小电芯电压 CellVolt1 降到 3200mV 时刻。于是, 在 log 数据往前找到电芯电压最低的那一节、单节 Cell 电压 3200mV 的位置, 如图 4 log 数据第 12621 行, DODO Passed Q = 4550mAh, 即真实 FCC 容量是 4550mAh。这样看到电量计上报的 FCC 与实际放电真实 FCC 相差就很小了。

	A	B	C	D	E	F	G	I
1	ElapsedTime	ElapsedTime	Voltage	Current	FullChgCap	CellVolt1	CellVolt2	DOD0 Passed Q
12617	32876.969	17444.953	6468	-930	4483	3203	3263	4549
12618	32878.5	17446.484	6465	-930	4483	3202	3262	4549
12619	32879.766	17447.75	6463	-930	4483	3200	3261	4550
12620	32881.36	17449.344	6459	-930	4483	3200	3260	4550
12621	32882.641	17450.625	6460	-930	4483	3198	3259	4550
12622	32883.922	17451.906	6456	-930	4483	3198	3258	4551

**Figure 4. Term Min Cell V 决定真实 FCC 容量范围**

### 3.2.2. 分析 True FCC 组成部分

我们还可以用前面电量计 FCC 定义来检查 FCC 组成部分  $FCC = Q_{start} + PassedCharge + RM$ ，判断 FCC 大小是否合理、偏小原因。

以客户经常关心的电量计退出 Shutdown 激活的场景为例。这种场景经常出现在电池包 Shutdown 运输，QC 抽检需要激活电量计检查 FCC，或者电池包运输到主机端装机激活电量计检查 FCC。电量计退出 Shutdown 模式 Wakeup 的过程跟 Reset 一样，都是重新采电压、电流、温度，重新仿真计算 FCC 的过程。表 1 分析了 Reset or Wakeup 时 FCC 组成及误差来源。

**Table 1. Reset or Wakeup 时 FCC 组成分析**

FCC 组成部分	Reset or Wakeup 时计算方式	对 FCC 的影响
Qstart (InitialQ)	采样电池电压更新 DOD0，与 DataFlash 记录的 DODatEOC 和 Qmax 一起计算 $Q_{start} = (DOD0 - DODatEOC) \times Q_{max}$	(1) 如果电池实际放电容量偏小则 Qmax 偏小，从而导致 Qstart 和 FCC 偏小。 (2) 如果 CHEM ID 不匹配，OCV 误差大则会导致 Qmax, Qstart, RM, FCC 等不准。 (3) 如果采样电压不稳定或者处于锂电池电压平坦区则带来 Qstart 误差。
PassedCharge (PassedQ)	为 0	为 0 则无影响
RM (TrueRemQ)	以当前 DOD0 为起点，以 DataFlash 记录的 Avg I Last Run / Avg P Last Run 为仿真负载，以 DataFlash 记录的阻抗 R 为基础，迭代仿真计算带载电压 $V(DOD[i], T) = OCV(DOD[i], T) - Avg I Last Run \times R(DOD[i], T)$ 直至 $V(DOD[i], T) < Terminate Voltage$ 则停止 DOD[i] 迭代，从而确定 RM	(1) 如果仿真负载 Avg I Last Run 偏大则会导致 RM 和 FCC 偏小。 (2) 如果仿真阻抗 R 偏大则会导致 RM 和 FCC 偏小。 (3) 如果 Reset or Wakeup 时温度低也可能导致 RM 和 FCC 偏小。

### 3.3. 优化方法

基于前面 FCC 偏小的原因分析，优化方法可以从以下方面考虑：

(1) 定制或匹配 CHEM ID，获得准确 OCV。

参考《阻抗跟踪电量计化学 ID 获取方法》。

(2) Golden Learning，获得准确阻抗 R。

参考《电量计 Golden Learning 方法及易错分析》。如果满充结束时 FCC 偏小可考虑用 GPCRA0 工具优化 Ra0 来提高 FCC。如果低温下 FCC 比实际放电容量偏小则可考虑用 GPCRB 工具优化低温模型来提高 FCC。

(3) 调整仿真负载，贴近实际放电负载。

由于 RM, FCC, RSOC 都是对未来电池状态的预估，所以都需要预设用于仿真计算的负载模型（Load Select / Load Mode）。BQ40Z50-R2 提供丰富多样的仿真负载模型，如表 2 所示。我们在配置参数时应该选择与实际负载模式最接近的 Load Select / Load Mode。

**Table 2. BQ40Z50 仿真负载模型 Load Select / Load Mode**

<i>Load Select</i>	<i>Constant Current (Load Mode = 0)</i>	<i>Constant Power (Load Mode = 1)</i>
= 0	Avg I Last Run	Avg P Last Run
= 1	Present average discharge current	Present average discharge power
= 2	Current()	Current() × Voltage()
= 3	AverageCurrent()	AverageCurrent() × average Voltage()
= 4	Design Capacity mAh/5	Design Capacity cWh/5
= 5	AtRate() (mA)	AtRate() (cW)
= 6	User Rate-mA	User Rate-cW
= 7	Max Avg I Last Run	Max Avg P Last Run

Avg I Last Run / Avg P Last Run 是电量计内部寄存器记录上一次放电周期的全程平均电流/功率。

Present average discharge current / Present average discharge power 是电量计内部寄存器记录当前放电周期的全程平均电流/功率。

曾经有一个客户反馈有一个电池在退出 Shutdown Mode 后 wakeup FCC 比 Design Capacity 偏小很多，Design Capacity = 4070mAh，但 FCC = 3510mAh。后来分析其原因是这个电池在进入 Shutdown Mode 前为了缩短老化时间，用了很大电流(约 0.5C)放电至出货容量要求，然后 Shutdown 了。于是 data flash 的 Avg I Last Run 记录了 0.5C 电流。退出 Shutdown Mode wakeup 时按 Avg I Last Run 0.5C 电流来仿真得到的 FCC 比 Design Capacity 偏小。当把 Avg I Last Run / Avg P Last Run 都改为 0.2C 后复位 FCC 变成 4020mAh 了。如果电池需要老化或充放电至指定出货容量的话，建议最后一段

是充电至指定容量。Shutdown 前设置 Avg I Last Run / Avg P Last Run / Max Avg I Last Run / Max Avg P Last Run 为 0 或者 0.2C 以内。

#### (4) 优化仿真参数

- **Term Voltage, Term V Hold Time:** 建议 Term Voltage 设在电压平坦区以后拐弯区以下并且尽可能低一些，比如锂离子电池设为 3000mV；Term V Hold Time 设置 2s 以上。
- **Current Threshold:** 电量计 data flash 参数配置里用 Dsg Current Threshold, Chg Current Threshold, Quit Current 来区别 Charge mode, Discharge mode 和 Relax mode。这三个 current threshold 不宜设太小。Dsg Current Threshold 设置在系统正常工作最小电流，不是系统待机电流，避免长时间待机小电流影响 average current (average since start of discharge) 变得很小，导致负载预估偏小。Quit Current 可设置在系统待机电流以上，最大不超过 C/20，比 Dsg Current Threshold 和 Chg Current Threshold 小即可。

## 4. 总结

FCC 是从满充开始放电到 Terminate Voltage 累计放出的电量，是相对的、变化的。FCC 与标称容量 Design Capacity 定义不同，FCC 比 Design Capacity 大或小都是有可能的。仿真负载  $I$ 、电池阻抗  $R$ 、温度  $T$ 、 $Q_{max}$ 、OCV、TermVoltage、DOD0、DODatEOC、PassedCharge 等都会影响 FCC 大小。本文以 [BQ40Z50-R2](#) 为例用实际充放电案例分析了 True FCC 和 Filtered FCC 更新机制。对于客户常常关心的 FCC 偏小问题，本文提供了分析方法和优化方法，以帮助优化 FCC 表现，提升用户体验。

## 参考文献

1. *Theory and Implementation of Impedance Track™ Battery Fuel-Gauging Algorithm in bq20zxx Product Family*: <http://www.ti.com/lit/an/slua364b/slua364b.pdf>
2. BQ40Z50-R2 Technical Reference Manual, <http://www.ti.com/lit/pdf/sluubk0>
3. GPCRA0, <http://www.ti.com/tool/GPCRA0>
4. GPCRB, <http://www.ti.com/tool/GPCRB>
5. 阻抗跟踪电量计化学 ID 获取方法, <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/zhca838/zhca838.pdf>
6. 电量计 Golden Learning 方法及易错分析, <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/zhca955/zhca955.pdf>

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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 © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司