

Application Note

电池电量监测算法比较



Nick Richards

摘要

本应用手册探讨并比较了用于电池电量监测的不同算法，包括电压相关性、电压 + IR 校正、库仑计数、CEDV 和 Impedance Track。

内容

1 简介.....	2
2 电压相关性.....	2
3 电压 + IR 校正.....	2
4 以库仑为单位计.....	3
5 CEDV.....	4
6 Impedance Track.....	5
7 算法比较.....	7
7.1 计算 SOC 误差.....	7
7.2 比较 SOC 误差.....	8
8 总结.....	10
9 参考资料.....	10

插图清单

图 2-1. OCV 查询表和图.....	2
图 3-1. 电压 + IR 压降图.....	2
图 4-1. 低温对容量的影响.....	3
图 5-1. CEDV 参数.....	4
图 5-2. EDV 阈值.....	4
图 6-1. Impedance Track 模式更改示例.....	5
图 6-2. Q_{max} 测量值示例.....	6
图 7-1. 测试 1 的电压和电流曲线.....	7
图 7-2. 测试 2 的电压和电流曲线.....	7
图 7-3. 测试 1 和 2 的电压相关性 SOC 误差.....	9
图 7-4. 测试 1 和 2 的电压 + IR 校正 SOC 误差.....	9
图 7-5. 测试 1 和 2 的库仑计数 SOC 误差.....	9
图 7-6. 测试 1 和 2 的 Impedance Track SOC 误差.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

估算电池的荷电状态是一项具有挑战性的任务，为此，人们使用了多种不同类型的算法来尽可能降低精度误差。当今一些常用的算法包括：电压相关性、电压 + IR 相关性和库仑计数。通过将这些通用电量监测算法与 TI 的 Impedance Track 算法进行比较，可以了解 Impedance Track 为何可实现超高精度的电池电量监测。

2 电压相关性

电压相关性是进行电池电量监测的非常基本的方法。该算法利用电池的 OCV (开路电压)，并将该值关联到电压查询表，其中每个电压对应于不同的 SOC (荷电状态)。

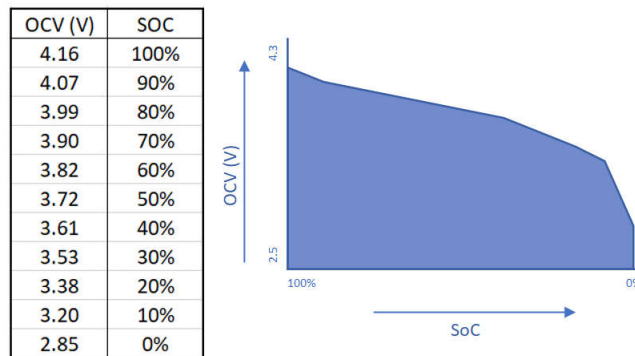


图 2-1. OCV 查询表和图

例如，图 2-1 显示了锂离子电池的电压查询表。使用电压相关性方法，如果电池的 OCV 为 3.72 伏，则电量监测计可以预测该给定时间的 SOC 为 50%。

虽然电压相关性是一种非常容易实现的方法，但相关性确实有许多缺点。电压相关性只能报告 SOC，而不能报告 SOH (健康状态)、剩余容量和剩余运行时间等其他重要数据。此外，不会针对放电速率、温度和电池寿命等重要因素调整 SOC。

由于这个因素，我们建议对电池长时间静止的应用使用电压相关性，在这些应用中可使用 OCV 来准确确定 SOC，或电流足够低而 OCV 仍然准确。

3 电压 + IR 校正

电压 + IR 校正通过考虑对电池施加负载时发生的 IR 压降来对电压相关性进行扩展研究。IR 压降的大小取决于电池的内部阻抗、负载电流和电池的温度。

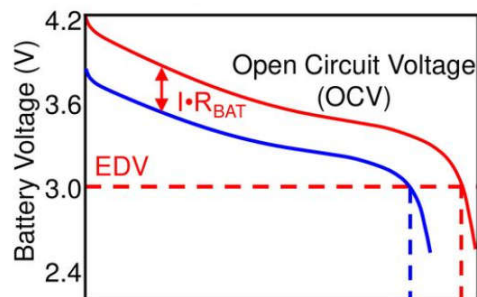


图 3-1. 电压 + IR 压降图

电压 + IR 校正的缺点是，由于内部阻抗增加，因此在测量老化的电池和/或电池暴露于低温时，这可能会产生更大的误差。不过，电压 + IR 校正功能改善了电压相关性的一些缺点。SoC 能够在放电结束时根据放电速率和温度进行调整。

4 以库仑为单位计

库仑计数用于直接测量进出电池的电荷量。[方程式 1](#) 用于库仑计数，其中电荷的电流等于起始电荷量加上随时间变化的电流积分。

$$q(t) = q_0 + \int (I(t) \times dt) \tag{1}$$

库仑计数的主要问题是，要知道电池中的起始电量是多少。因此，需要满电荷来初始化 SOC，否则 SOC 是未知的。库仑计数的一个缺点是，需要满电荷容量来报告精确的 SOC，为了求出满电荷容量，需要完全放电至空电，这对于大多数应用来说是不可行的，因为它会在关闭时导致数据丢失。库仑计数的另一个问题是，如果电池的温度发生极端变化，则可能会错误地报告 SOC。例如，如果电池在室温下充电，库仑计数可以计算出 2250mAh 时的满电荷容量。然后，如果在非常冷的条件下使用电池，则由于低温会导致开路电压的 IR 压降更大，总可用容量可能会降低至 1100mAh。室温和低温下的满电荷容量之间存在约 51% 的差异，这将导致库仑计数报告的电量比电池中实际剩余的电量多。

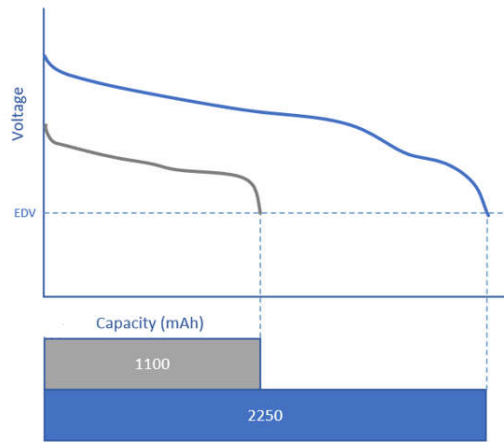


图 4-1. 低温对容量的影响

5 CEDV

CEDV 是一种使用库仑计数作为电量监测支柱的算法。CEDV 算法以数学方式将电芯电压建模为电池 SOC、温度和电流的函数。电池电压模型用于校准满电荷容量 (FCC)，而补偿电池电压用于放电结束警报以及当电量监测计报告 0% SOC 时的情形。此算法使用因电池而异的特定参数，这些参数可通过 GPCCEDV 工具收集。

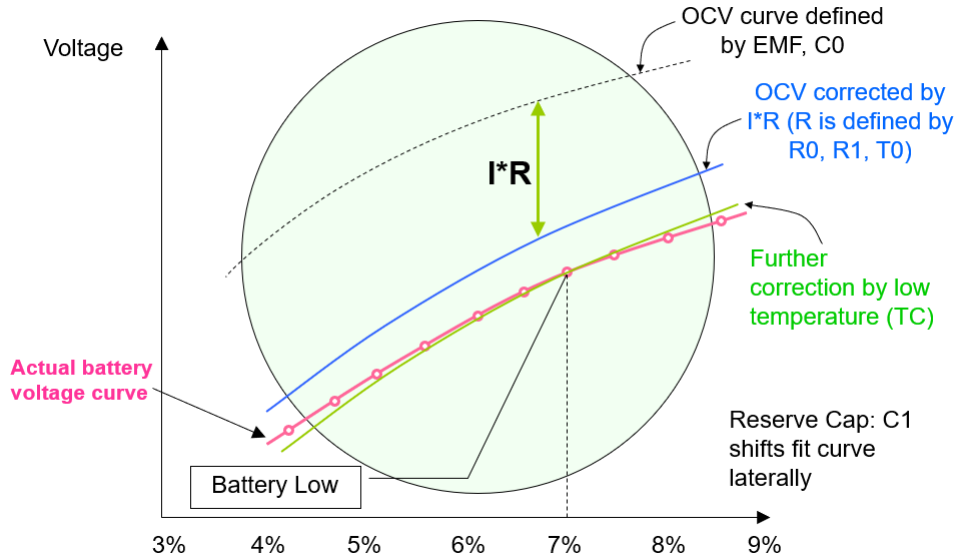


图 5-1. CEDV 参数

图 5-1 是 CEDV 参数的直观表示。参数 EMF 和 C0 定义了函数 $OCV(SoC, T)$ 。参数 R_0 、 R_1 和 T_0 定义了 $R(SoC, T)$ 。 R_1 定义了 $R(SoC)$ 依赖关系的斜率。 R_0 定义了 R 的幅度。 T_0 定义了 $R(T)$ 依赖关系的斜率。

电量监测计在完全放电之前需要学习。因此，电量监测计设置了与给定的剩余容量百分比相对应的电压阈值。这些参数是 EDV2、EDV1 和 EDV0，通常分别设置为 7%、3% 和 0%。这些参数在电池放电末期设置，因为这时不同 SOC 点之间的电压差异更大，这使电压读数误差可更最大限度地减少 SOC 计算中的误差。最后，仅在 EDV2 点学习温度和放电速率变化后的新 FCC。因此，在放电结束之前，SOC 可能会突然下降，如果温度低且放电速率高，有时可高达 50%。

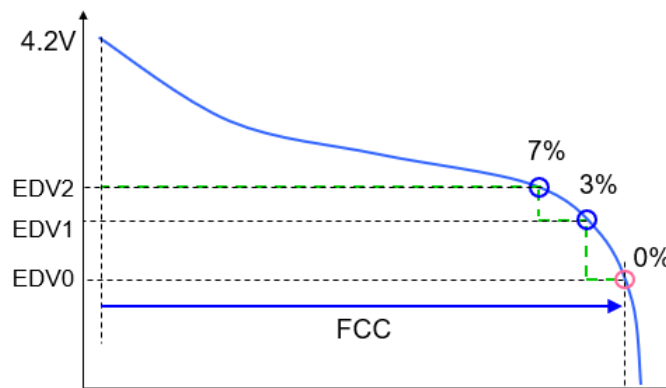


图 5-2. EDV 阈值

CEDV 提高了电压 + IR 校正算法的电量监测精度。CEDV 通过读取电压并在器件复位时将其与 10 点电压表相关联来估算电池的初始容量，从而改善库仑计数。一些问题包括自放电会影响准确度，需要电池完全放电才能了解准确估算 SoH 和 SOC 所需的 FCC。

CEDV 能够报告剩余运行时间。CEDV 还能够在放电结束时报告 SoH 和剩余容量，而 SOC 能够在放电结束时根据放电速率和温度进行调整。但是，与电压 + IR 校正不同，CEDV 无法以瓦时为单位报告剩余容量。CEDV 的缺点是电池的老化会导致电池的内部阻抗被低估，这会导致满电荷容量出现 15% - 25% 的误差，以及老化电池的 SOC 出现问题。

6 Impedance Track

Impedance Track 通过组合库仑计数和电压 + IR 校正等方面，极大地扩展了上述算法。Impedance Track 使用许多不同的因素来计算 SOC，包括：放电深度 (DOD)、总化学容量 (Q_{max})、取决于 DOD、电流负载和温度的内部电池电阻。

首先，Impedance Track 确定电池当前处于充电、放电或弛豫状态。需要在电量监测计中设置一些参数来区分这三种不同的状态，包括：Chg Current Threshold、Dsg Current Threshold、Quit Current、Chg Relax Time 和 Dsg Relax Time。

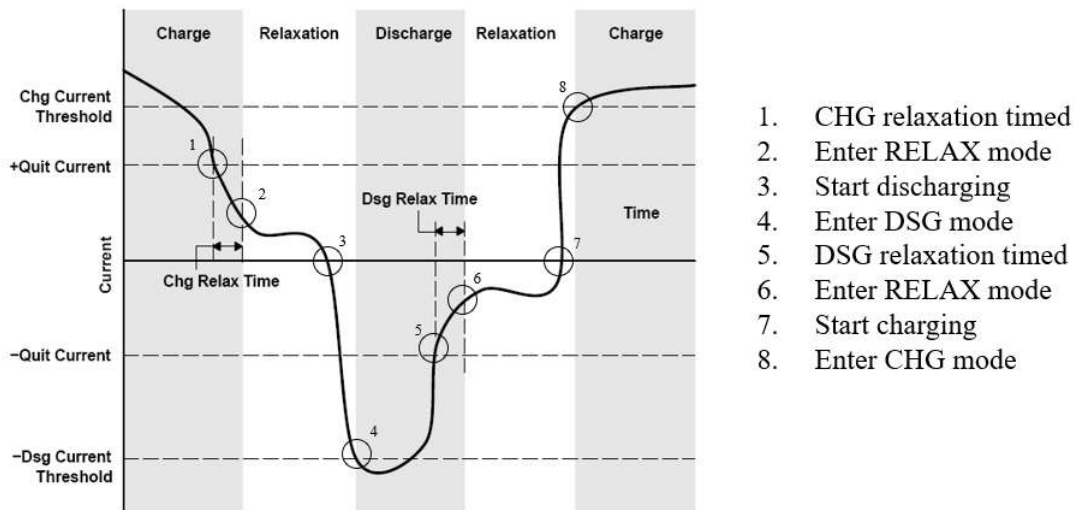
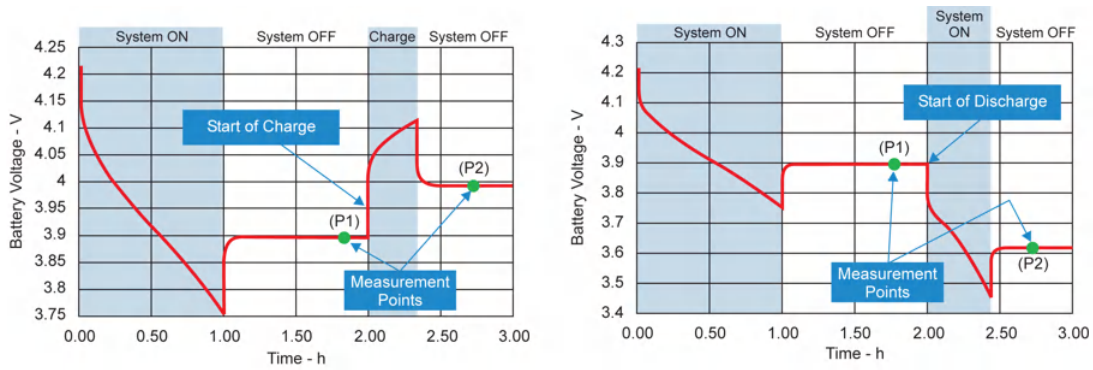


图 6-1. Impedance Track 模式更改示例

当电池处于弛豫状态时，电量监测计会根据 OCV 读数更新化学放电深度 (DOD_0)。通过将当前的 OCV 和温度与预定义的 $DOD(OCV,T)$ 表相关联来求出 DOD。该表特定于每个电池的每种不同化学物质，并根据化合物 ID 进行区分。当电压变化率小于 4 微伏/秒时，便会读取 OCV。如果 OCV 读数期间的电流为非零，则进行 IR 校正。

电量监测计能够更新充电或放电前后两个 DOD 读数之间的 Q_{max} ，如图 6-2 所示。要更新 Q_{max} ，根据电池的设计容量，电荷变化需要超过 37%。如果电量监测计进行第一次 Q_{max} 更新，则电荷需要至少变化 90%。库仑计数用于确定电荷变化。方程式 2 显示了如何计算 Q_{max} 。

$$Q_{max} = \frac{\Delta\text{charge}}{SOC_1 - SOC_2} \quad (2)$$


 图 6-2. Q_{max} 测量值示例

电量监测计能够在电池放电期间更新电池的内部电阻表 (R_a 表)。内部电阻的计算方法是：用 $OCV(DOD, T)$ 表中相应 DOD 点的当前负载电压差除以测量的电流。方程式 3 显示了如何计算内部电阻。

$$\text{InternalResistance} = \frac{OCV(DoD, T) - \text{PresentLoadedVoltage}}{\text{MeasuredCurrent}} \quad (3)$$

该算法使用上述所有信息，根据用户编程的 Load Select 运行仿真，从而计算 SOC。仿真会根据通过的电荷每秒计算一次剩余容量 (RemCap)，并且 FCC 在某些情况下可以更新。FCC 可以在电阻网格点更新期间、弛豫期间或进入充电或放电期间更新。

Impedance Track 对先前所讨论的算法进行了许多改进。首先，与需要满电荷才能初始化 SOC 的库仑计数/CEDV 不同，Impedance Track 不需要满电荷即可初始化 SOC。自放电通常由 OCV 读数进行补偿，这使得 SOC 精度保持在高水平，即使长时间处于空闲状态也是如此。电池的内部电阻不断更新，因此对于老化的电芯，电量监测误差保持在较小水平，并且当放电速率较高时，误差不会增加。温度补偿电阻更新可在内部电池阻抗较高的较低温度下提高电量监测精度。由于 Impedance Track 不断重新运行仿真，因此在放电期间的临界点更新满电荷容量（以 mAh 和 Wh 为单位报告）。由于 Q_{max} 和 R_a 表始终更新，因此 SoH 也会持续更新。SOC 能够在电池的整个放电过程中针对放电速率和温度进行调整。

7 算法比较

为进行此比较，我们使用了机器人真空吸尘器收集正常工作期间的电压和电流数据。在测试环境中，机器人使用 4S2P 电池在室温下吸尘和拖地。进行了两项测试，展示了两种不同的负载分布。在第一次测试中，机器人用吸尘器吸了短绒地毯。图 7-1 展示了该测试的电压和电流曲线。

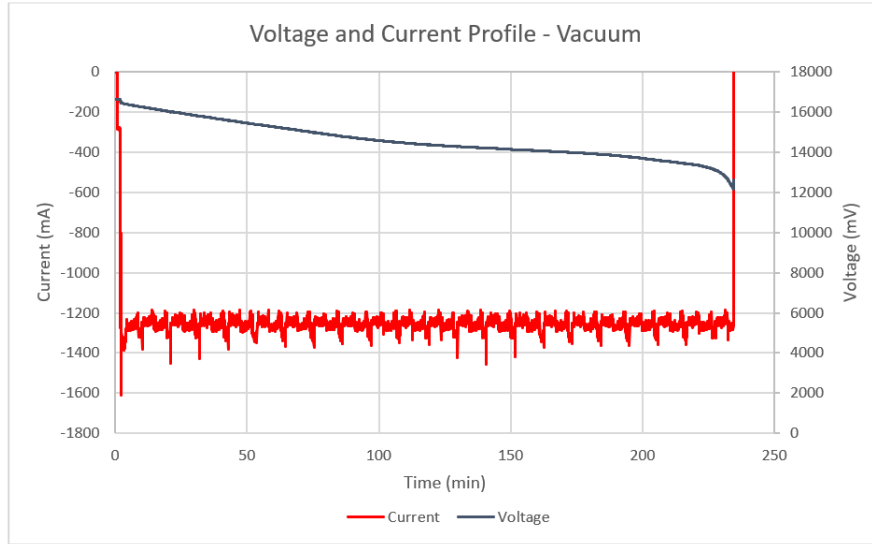


图 7-1. 测试 1 的电压和电流曲线

在第二次测试中，机器人拖了瓷砖地板。机器人可以返回基站重新浸湿拖布，并对电池进行短时间充电。图 7-2 展示了该测试的电压和电流曲线。

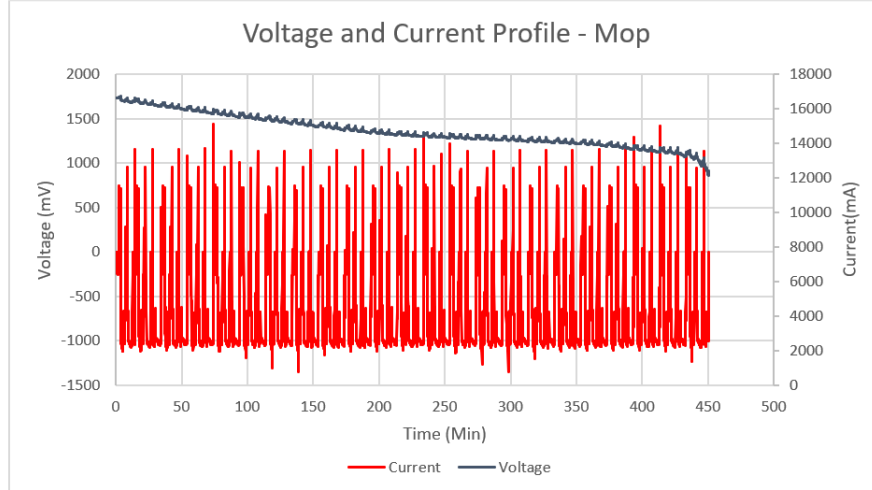


图 7-2. 测试 2 的电压和电流曲线

7.1 计算 SOC 误差

为了比较所讨论的不同算法，可以使用 SOC 误差。SOC 中的误差直接反映了电量监测算法的准确性。SOC 误差较小代表电量监测算法更准确，反之亦然。通过获取真实 SOC 与计算得出的 SOC 之间的差值来求出 SOC 误差。由于测试使用了 TI Impedance Track 电量监测计，因此在收集的数据中报告了 Impedance Track 算法计算出的 SOC。但这意味着，必须计算电压相关性、电压 + IR 校正和库仑计数算法计算出的 SOC 以及真实的 SOC。

7.1.1 计算真实 SOC

第一步是使用 [方程式 4](#) 计算两个采样点之间的通过电荷 (dQ)。通过电荷是之前通过的电荷的滚动总和。请注意，dQ 被标准化为小时，因此如果以秒为单位报告数据，则需要将经过的时间除以 3600 以换算为小时。

$$dQ_N = \frac{(ElapsedTime_{N+1} - ElapsedTime_N) \times Current}{3600} + dQ_{N-1} \quad (4)$$

接下来是计算电池的真正满电荷容量，即所有通过电荷的总和。之后，可使用 [方程式 5](#) 计算每个采样点的剩余容量。

$$CalculatedRemainingCapacity = CalculatedFCC - dQ \quad (5)$$

最后，可以使用 [方程式 6](#) 求出每个采样点的真实 SOC。

$$TrueSOC = \frac{CalculatedRemainingCapacity}{TrueFCC} \times 100 \quad (6)$$

7.1.2 求出电压相关性和电压 + IR 校正计算出的 SOC

对于电压相关性和电压 + IR 校正，使用了 11 点 OCV 表。使用线性内插来报告更准确的 SOC，而不是以 10% 的增量报告 SOC。

对于电压 + IR 校正，从弛豫期后的第一次放电计算电池的内部电阻。计算出内部电阻后，使用 [方程式 7](#) 对放电期间测量的任何电压进行标准化。

$$Normalized\ Voltage = Measured\ Voltage + |Measured\ Current * Internal\ Resistance| \quad (7)$$

7.1.3 求出库仑计数计算出的 SOC

为了进行比较，库仑计数算法假设电池在满电荷时启动，以显示理想情况。使用了 [方程式 8](#) 来计算库仑计数的 SOC。

$$SOC_N = \left(1 - \left| \frac{\sum_0^N dQ}{DesignCapacity} \right| \right) \times 100 \quad (8)$$

设计容量是电池数据表中规定的容量。

7.2 比较 SOC 误差

测试 1 的电压相关性峰值误差约为 20%，而测试 2 的峰值误差约为 17%。测试 1 的电压 + IR 校正峰值误差约为 11%，而测试 2 的峰值误差约为 10%。假设未获知 FCC，测试 1 和 2 的库仑计数峰值误差都约为 6%。在后续周期中，假设温度和负载相似，库仑计数可能具有低误差。对于测试 1 和 2，Impedance Track 的峰值误差都约为 1%。

CEDV 精度与库仑计数器误差非常相似，因此这些负载曲线示例的图形比较中未显示 CEDV。

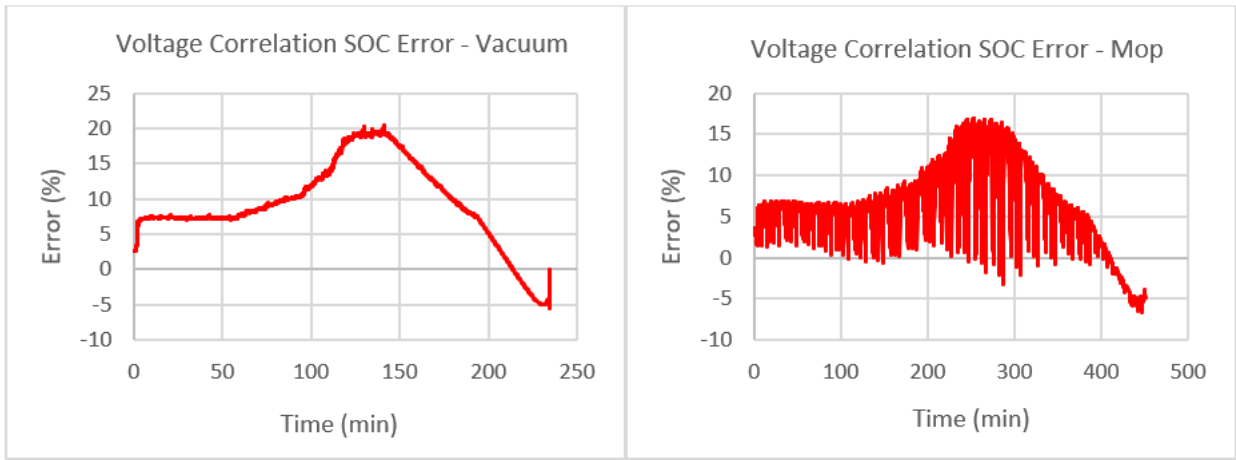


图 7-3. 测试 1 和 2 的电压相关性 SOC 误差



图 7-4. 测试 1 和 2 的电压 + IR 校正 SOC 误差

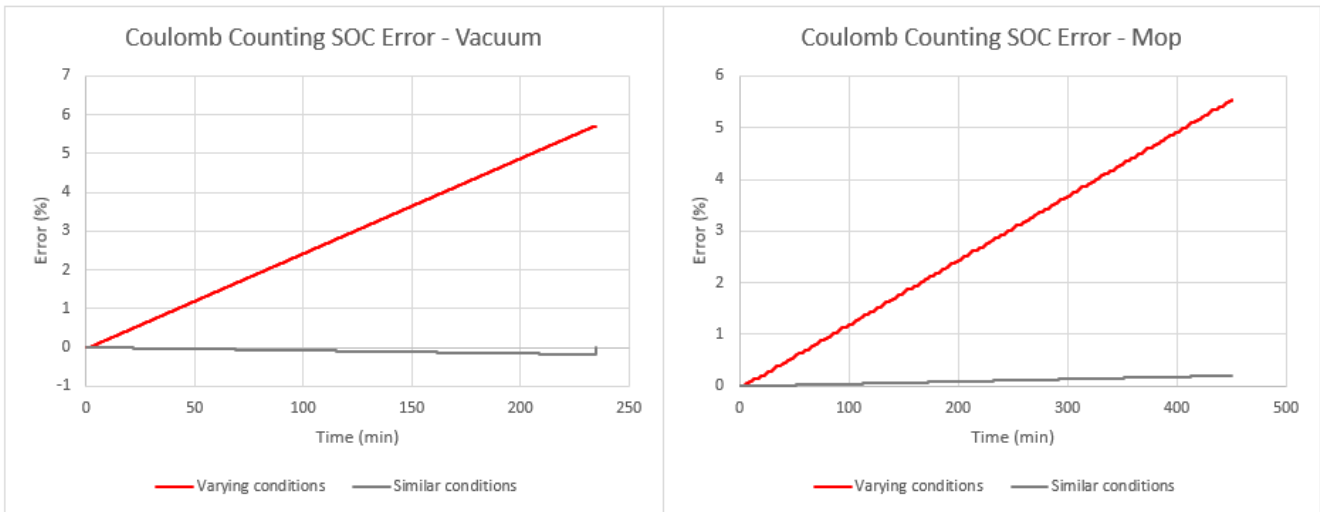


图 7-5. 测试 1 和 2 的库仑计数 SOC 误差

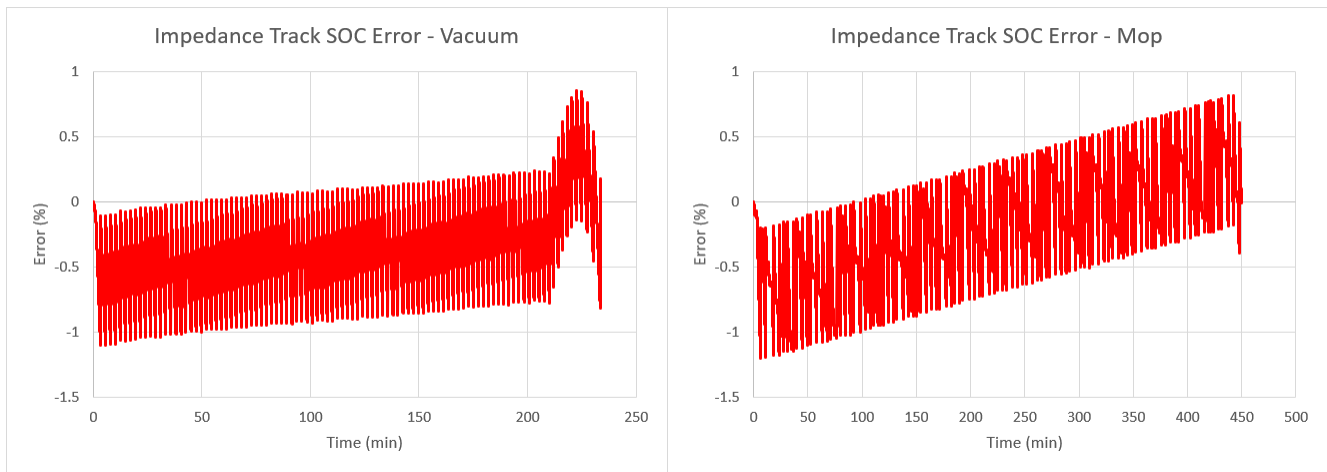


图 7-6. 测试 1 和 2 的 Impedance Track SOC 误差

8 总结

与其他常用算法相比，Impedance Track 可提供超高精度的电池电量监测。电压相关性是最简单的监测方法，Impedance Track 方法的 SOC 误差最大。电压 + IR 校正可将电压相关性产生的峰值 SOC 误差减少一半，而库仑计数可进一步减少 SOC 误差。Impedance Track 使用所有这三种算法，因此可提供最准确的电量监测。使用精确电量监测算法的主要好处是，它可以延长应用的运行时间。

9 参考资料

- 德州仪器 (TI), [bq2750x 系列中 Impedance Track™ 电池电量监测算法的理论及实现](#)
- 德州仪器 (TI), [如何计算充电状态 \(SoC\) 精度](#)
- 德州仪器 (TI), [Impedance Track 常见问题解答](#)

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司