参考文献

Application Note

BQ41Z50 的 IT-DZT 算法概述

Charles Sestok

摘要

本应用手册介绍了德州仪器 (TI) 电池电量监测算法的简短历史，说明了负载电流频繁、快速变化时电池电量监测计运行时的挑战，并详细介绍了应用于动态负载电流应用的 Dynamic Z-Track™ (IT-DZT) 算法的特性和优势。

内容

1 简介.....2
2 电池电量监测算法背景.....2
3 电池建模.....3
4 电池充电状态估算和剩余电量预测.....5
5 在对电池对动态负载电流的响应建模时的挑战.....6
6 处理电池动力学的方法.....7
6.1 监测动态负载精度的好处.....7
6.2 算法性能.....7
7 总结.....10
8 参考资料.....10

插图清单

图 2-1. 动态电池功率技术示例负载电流.....2
图 3-1. 低频电池模型.....3
图 3-2. 电池电阻随年龄的变化.....4
图 4-1. 剩余容量预测.....5
图 5-1. 电池瞬态响应.....6
图 6-1. 剩余容量估算比较：IT-DZT 与无电阻更新、1C 负载.....8
图 6-2. 剩余容量估算比较：IT-DZT 与无电阻更新、1.75C 负载.....9

表格清单

表 7-1. IT-DZT 和 IT 的比较.....10

商标

Dynamic Z-Track™ and Impedance Track™ are trademarks of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SLUAB20
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

1 简介

本应用手册介绍了 BQ41z50 和其他德州仪器 (TI) 电池电量监测计器件中使用的德州仪器 (TI) Dynamic Z-Track™ (IT-DZT) 算法。测量算法是 Impedance Track™ (IT) 监测算法的后继产品，许多以前的 TI 电池测量器件（如 BQ40z50、BQ27z561、BQ27z746、BQ34z100 等）中均采用后者。IT-DZT 算法的设计是要在当电池负载电流在长时间内出现频繁且快速的变化时，在应用环境中实现准确的电池电量监测。

2 电池电量监测算法背景

电池电量监测计提供了确定为电子或机电系统供电的电池组的特性所需的信息。电池电量监测计可估算电池或电池组的剩余电量、荷电状态和健康状况。

电池电量监测计通常依靠利用负载电流特性的近似值来进行精确的电池参数和状态估算，同时降低计算开销和功耗。在传统上使用电池电量计的系统（例如笔记本电脑和平板电脑、手机和其他个人电子设备）中，负载电流变化缓慢，并具有较长的空闲时间。在这些情况下，可以通过直接测量空闲期间的电池电压来确定电池的荷电状态。当电池负载电流空闲足够长的时间后，电池开路电压 (OCV) 和荷电状态 (SoC)（即放电程度 (DoD)）之间会存在一一对应的映射。当负载电流恒定或长时间缓慢变化时，可以使用电压和电流测量值来估算标准化为室温的电池电阻的曲线。

但是，电子器件的使用趋势是将电池电源应用于长时间具有高动态负载电流的器件和应用。系统以前通过有线连接供电，现在通常使用电池供电，为客户提供更高的便携性和灵活性。电动工具、无人机和清洁机器人是在负载电流发生高度变化的情况下应用电池电源的系统示例。此外，笔记本电脑等传统应用正在使用可变负载电流（例如动态电池功率技术 (Turbo 模式)）平衡计算吞吐量与系统功耗。在这些应用中，负载电流包括 10 秒的持续高电池电流 (SPC) 脉冲（最高可达电池 C 率的两倍）和 10ms 脉冲（最高可达电池 C 率 (CPC) 的四倍）。示例 DBPT 负载电流如 图 2-1 中所示笔记本电脑和移动个人电子产品中新兴的人工智能 (AI) 应用，例如使用神经网络进行分类或使用大型语言模型 (LLM) 生成内容，也需要从电池汲取的高度可变的负载电流。对于这些应用，电量监测计算法不能依赖于针对稳定且缓慢变化的负载电流而设计的近似值。

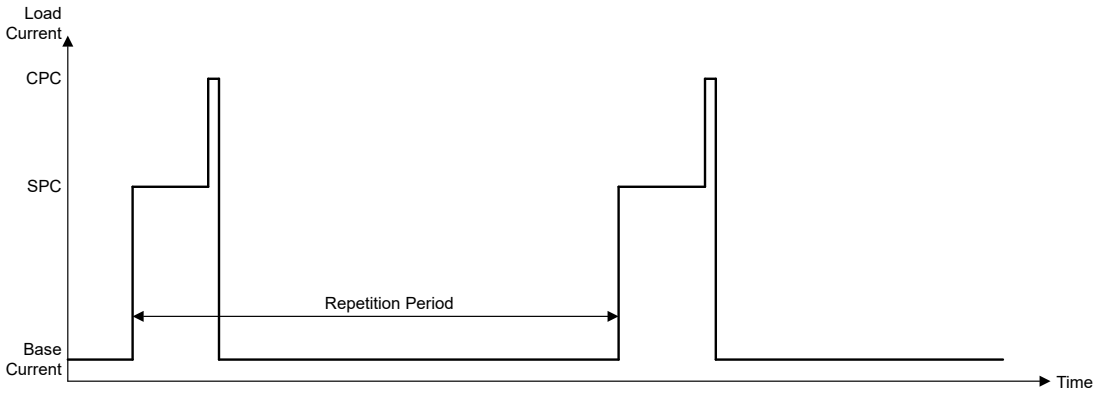

图 2-1. 动态电池功率技术示例负载电流

本文档的后续章节将介绍针对稳定负载电流进行电池建模所使用的近似值、这些模型对于具有动态负载电流的系统的缺点、对动态负载的电池行为进行建模的技术、基于动态模型的计量算法、以及对剩余容量的精度和充电状态估算的影响。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3 电池建模

许多电池电量监测计算法都使用电池的等效电路模型来提供有关电池包的所需信息。电量监测计算法使用的电池模型用于管理准确度之间的权衡，该精度表示电池电压对预期负载电流的响应与参数估算相关的计算复杂性。基于 IT 的电量监测计使用的电量监测计算法针对具有稳定负载电流的应用进行了优化。在这些情况下，长时间内电池负载变化不大。捕获电池低频行为的模型足以进行电池电量监测，如所示 图 3-1。节点 V_{term} 和 Gnd 表示正电压电池端子以及接地的电池端子。对于包含多节串联电芯或模块的电池组，只有电池组中底部电池的端子连接到系统接地。电阻 R_S 表示低频电池电阻。电容 C_S 表示电池的脚趾电荷储存。在实际电池模型中，R_S 和 C_S 参数取决于电池条件（如 SoC）和环境条件（如温度）。

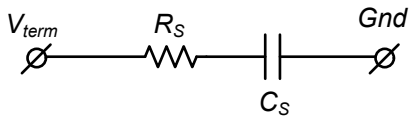

图 3-1. 低频电池模型

典型低频电池模型包括一个电阻器和一个可变电容器，前者用于模拟负载电流对电池电压的影响，后者用于模拟放电时电池 OCV 的变化。OCV 是在没有负载电流流入或流出电池的情况下长时间后的电池电压。电池的 OCV 和低频电阻是 SoC 和电池电芯温度的函数。

电池 OCV 被描述为电池 SoC 的函数、或等效于 DoD。SoC 是电池中的剩余电量与总化学电荷存储容量（即 Qmax）之间的比率。Qmax 值是电池可在极低放电电流限制下提供的可用电荷。典型锂离子、NMC 和 LFP 电池化学物质的 OCV 与 SOC 曲线不会随电池的老化而显著变化。因此，Qmax 参数反映了超低负载电流下电池老化的影响。随着电池老化，估算的 Qmax 值会降低，这描述了电荷存储容量的损失。

电池电阻捕获大电流对电池端子电压的影响。对于稳定或缓慢变化的负载电流，电池 OCV 和测得的电池电压之间的差值与负载电流成正比。电池电量监测计作为 SoC 和 DoD 的函数保持电池的电阻估算值和温度灵敏度。对于稳定的负载电流，已知温度和 SoC，电池模型可以预测电池端子电压。

电池模型的初始参数通过确定新电池的特性来确定。由于 OCV 相对于 SoC 会发生少量漂移，因此这被视为电池模型的固定参数。监测计跟踪 Qmax 和固定温度电阻参数，因为这些参数会随着电池的老化而显著变化。对于典型的锂离子及相关电池化学成分，当 Qmax 降至原始值的 80% 时，将在使用寿命结束时视为电池。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

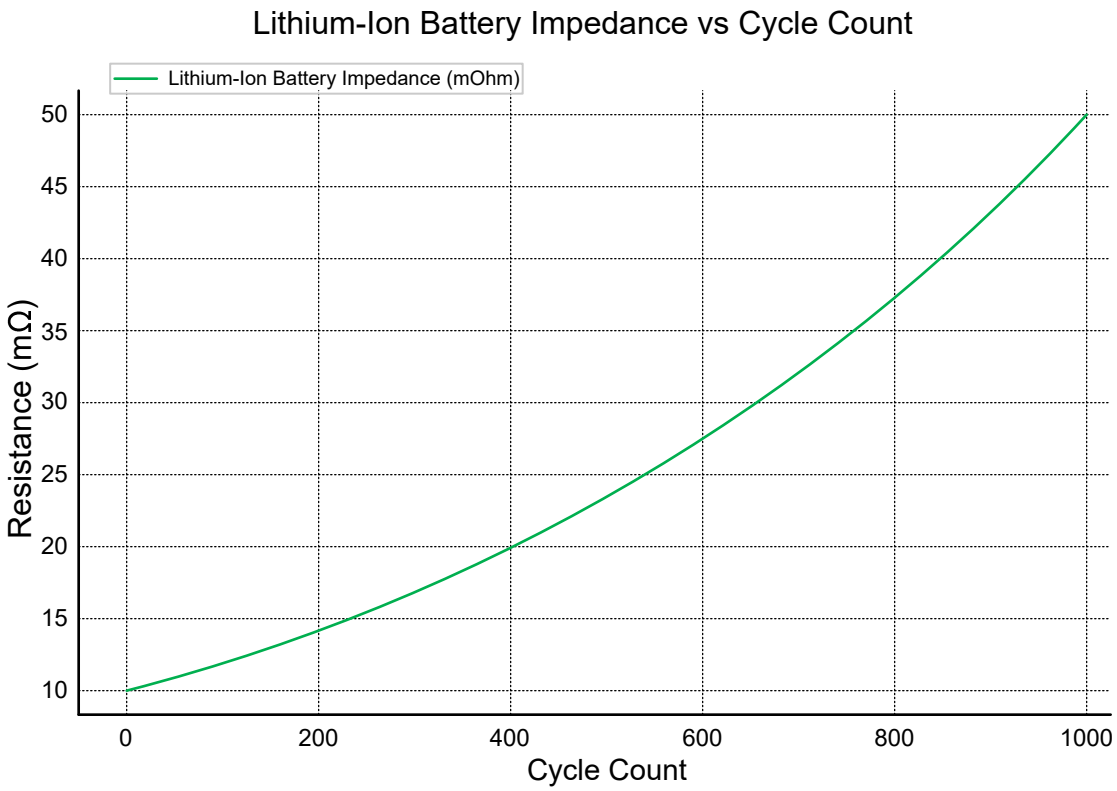

图 3-2. 电池电阻随年龄的变化

电池的低频电阻随年龄而显著增加，具体取决于电池的化学成分和使用情况，如 图 3-2 所示。在 100 个周期内，电池低频电阻的典型值可能会增加 60%，具体取决于电池化学成分和使用模式。

为了实现稳定的负载电流，使用单个电阻器对电池阻抗进行建模，可以在估算模型参数的计算复杂性与 SoC 监测计预测的精度和电池剩余容量之间进行合理的权衡。

基于 IT 的电量计中的电池 SoC 是通过电压测量或电流测量进行估算的，具体取决于负载电流的近期行为。当负载电流在足够长的时间内接近零时，电池电压与 OCV 匹配。由于 OCV 与 SoC 曲线是单调的，因此电压测量可映射到 SoC 的估算值。当电池充电或放电时，由于电池阻抗的影响，电池电压不会映射到正确的 SOC 值。为了降低电量监测算法的计算复杂性，SoC 是使用集成电流与电流流动时电池 Qmax 之间的比率进行估算的

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

4 电池充电状态估算和剩余电量预测

通过正确估算 Qmax 和电池阻抗参数，电量监测计可以预测各种负载电流下电池组中的剩余电量，如 图 4-1 所示。这个预测面临的挑战是估算电池 OCV 与电池端子上由负载电流和电池阻抗导致的输出电压之间的差值。针对这个预测用途，电量监测计假定有一个成功运行连接至电池组的整个电子系统所需的最低电压。电池容量预测是最近 SoC 估算值与 SoC 之间的差异，即电池端子电压预计将达到系统运行所需的最低电压。当 IR 压降可以忽略不计时，Qmax 值等于极小放电电流限制下的电池容量。电池的剩余容量是 图 4-1 中所示的总容量估算值与电池 DoD 估算值之间的差值。

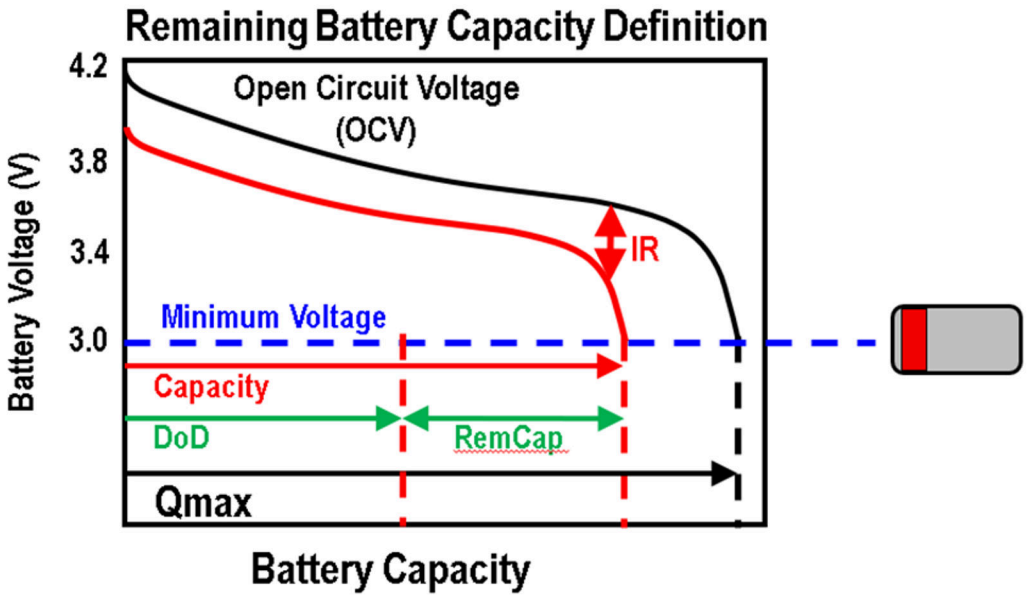

图 4-1. 剩余容量预测

剩余容量预测在很大程度上取决于负载电流和电阻。内部电池电阻上的 IR 压降使可由电池提供的电量成为负载电流的函数。对于较大的电流，电池端子电压会更快达到最小值。

仅使用电压测量而不进行 IR 压降补偿的电量监测计算法不会捕捉此效应，并产生不准确的剩余电池容量估算值。此外，不估算电池电阻随老化而增加的电量监测计算法可能会低估 IR 压降。这会导致对剩余容量的估算不准确。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

5 在对电池对动态负载电流的响应建模时的挑战

电阻器和电容器电池模型使用简单的等效电路捕获电池行为与老化和负载电流水平之间的重要关系。等效电路可在负载电流稳定且瞬态电压响应稳定时很好地反映电池的行为。在实践中，电池表现出电压瞬态响应，并具有很长的持续时间来响应负载电流的变化。

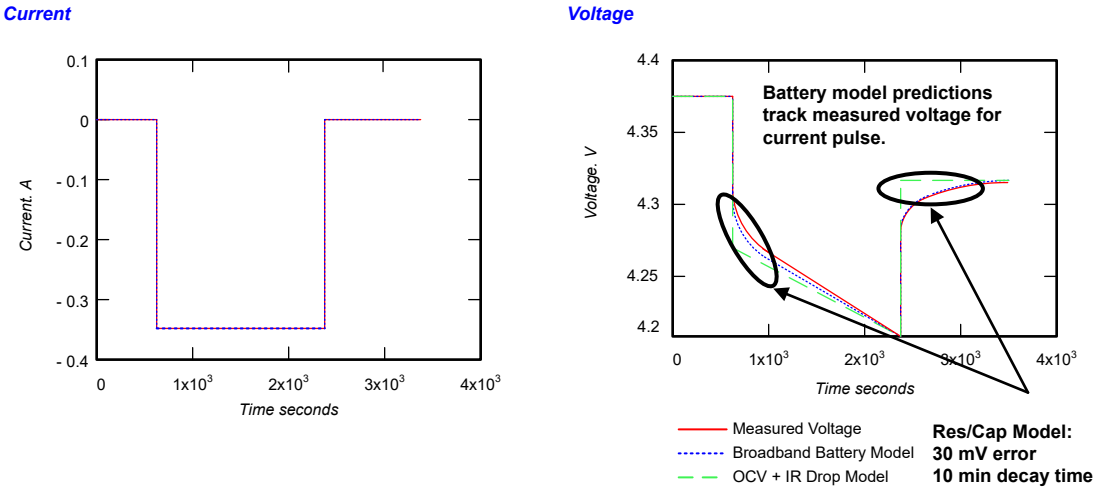

图 5-1. 电池瞬态响应

如 图 5-1 所示，电池电压瞬态可能需要 10 分钟以上的时间才能稳定，以响应负载电流的 C/2 阶跃。弛豫时间结束后，电阻器和电容器电池模型会精确预测电池端子电压。弛豫时间后，可以准确更新电池电阻模型，因为 OCV 和电池端子电压之间的差值等于该模型预测的 IR 压降。传统电量监测计算法（例如 IT 算法）不会更新电阻模型，除非负载电流足够稳定，而可以出现这种稳定。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6 处理电池动力学的方法

旁路

在基于电阻器和电容器等效电路的电池电量监测计中，电量监测计依赖于针对新电池测量的电阻模型，或者在负载电流稳定的时间足够长且电池瞬态稳定时更新电阻模型。当电池负载是高动态时，足够长的稳定电流间隔（足以验证瞬态稳定）不足够频繁，无法准确跟踪电阻随电池老化而增加的情况。在这些应用中，基于电阻器和电容器等效电路的电量监测计会低估电池的电阻。在这些情况下，IR 的下降会被低估，因此电量监测计高估了电池的剩余容量。在这种情况下，整个系统可能需要过早关闭，而终端电压可以比监测计预测的速度更快地接近最小值。

然而，在有稳定负载电流频繁间隔足以使电池瞬态响应稳定的应用中，传统的监测算法能够跟踪不断增加的电池电阻并准确预测电池剩余电量。

宽带电池建模

使用具有选择性更新的电阻器或电容器等效电路的另一种方法是使用更精确的宽带电池模型。如 图 4-1 中所示，宽带电池模型可以准确预测瞬态响应弛豫间隔期间的电池端子电压。设计合理的宽带电池模型可以针对任意负载电流条件准确生成瞬态响应，而不仅仅是阶跃响应。

Dynamic Z-Track (IT-DZT)

Dynamic Z-Track (IT-DZT) 算法依赖于电池响应的宽带模型，该模型可以生成长时间内的动态负载电流的准确的电池端子电压估算。IT-DZT 使用与基于其的电量监测计相同的值进行参数化：归一化为室温的电池电阻与 DoD 和最大电池电荷存储 (Qmax) 之间的关系。IT-DZT 算法使用简单电阻器和电容器电池等效电路中 IR 压降的校正因数来生成准确的电池端子电压预测和电池电阻估算值。Qmax 参数的估算方法与基于 IT 的电量监测计相同。

6.1 监测动态负载精度的好处

在电池电量监测中使用宽带模型有两个好处。首先，该模型可用于在电池端子电压尚未完全稳定的情况下估算电池电阻。宽带模型可以防止动态负载电流导致的不准确 IR 压降。无论负载电流特性如何，都可以跟踪电阻随老化的变化，因此对于具有动态负载电流的应用，可以正确预测剩余电池容量。其次，在考虑瞬态响应的情况下，可以使用该模型更准确地预测电池端子电压。

6.2 算法性能

IT-DZT 算法可改善动态负载应用的电阻估算和剩余容量预测。量化剩余容量改善的比较算法是补偿式放电终止电压 (CEDV) 电量监测计算法。此算法使用新电池估算的 IR 压降补偿来预测电池端子电压达到放电结束时的位置。IT-DZT 算法能够准确跟踪电阻，并保持在小误差容差范围内。对于老化的电池，在接近电池放电结束时电阻可能会增加 50% 以上，而 CEDV 电量监测计会低估负载电流引起的压降。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

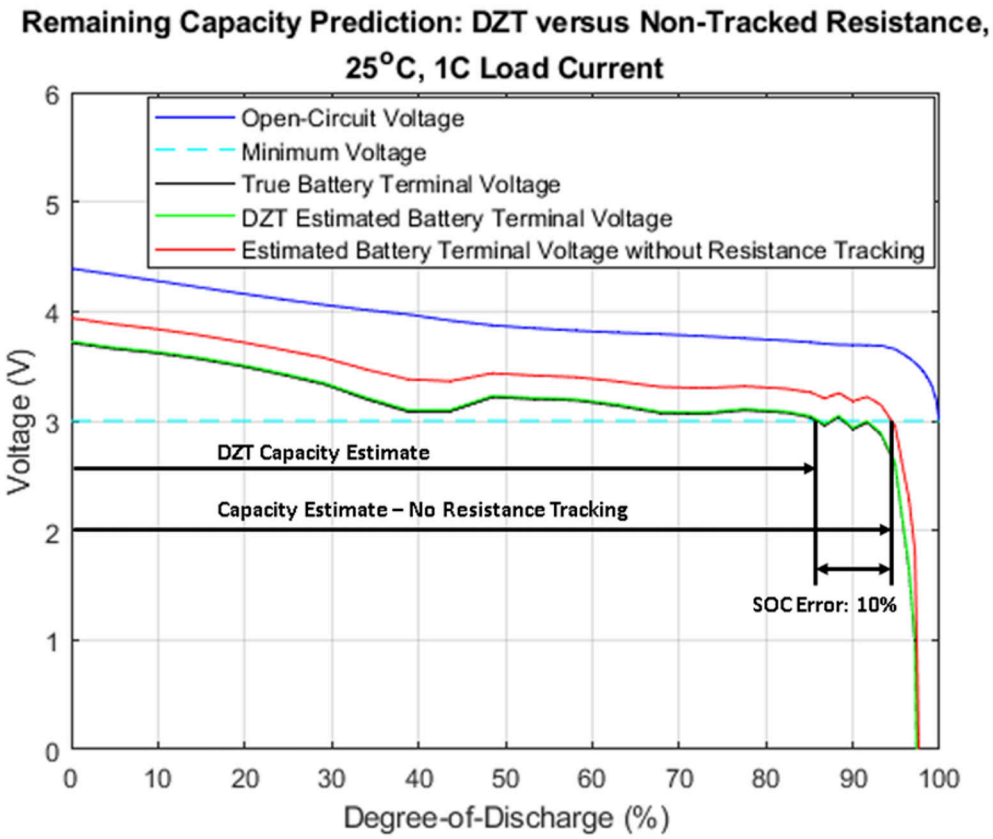

图 6-1. 剩余容量估算比较：IT-DZT 与无电阻更新、1C 负载

电量监测算法对剩余容量预测的影响如 图 6-1 所示。IT-DZT 算法能够在电池老化时准确跟踪电阻，并具有较小的误差容差。CEDV 算法显著低估老化电池的电阻。对于 图 6-1 中所示的 1C 负载，IT-DZT 算法可准确预测当电池电压达到最小 3V 阈值时的 SOC。CEDV 算法不能准确预测电压达到 3V 时的 SOC。与 IT-DZT 相比，该算法将电池剩余容量的估算值高估 10%。在较高的负载电流下，IR 压降更更大，因此 CEDV 中的剩余容量误差更大。对于所示的测试用例，1.75C 平均负载电流的高估误差为 60%，如 图 6-2 所示。

English Document: SLUAB20
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

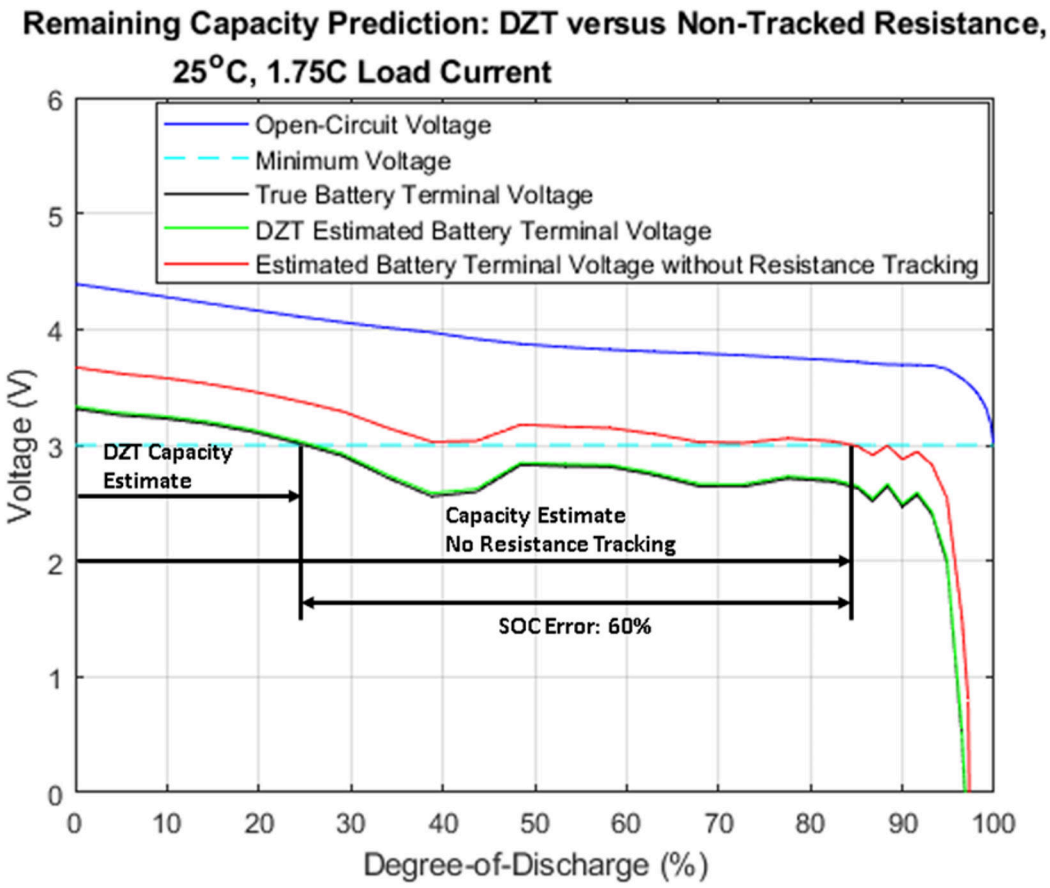

图 6-2. 剩余容量估算比较：IT-DZT 与无电阻更新、1.75C 负载

SOC 精度的预期提高取决于电池老化时的电池行为，以及放电期间负载电流的细节。对于某些负载电流，有频繁并且较长的稳定负载电流间隔，因此基于 IT 的电量监测计算法可以实现与 IT-DZT 相似的性能。电池使用寿命长，其电阻增加缓慢。在电池老化到足以使电阻显著增加之前，IT-DZT 和固定电阻之间剩余容量的估算间隙很小。

与 图 6-2 中的示例相比，电阻快速增加的电池在动态负载下 SOC 估计中的误差更大。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

7 总结

IT-DZT 电池电量算法可以更准确地估算具有动态负载电流的应用的电池电阻和剩余容量。IT-DZT 依赖对电池电量算法中电阻估算部分的电池弛豫进行补偿的宽带电池模型。通过在整个生命周期内准确跟踪电池电阻，可以在电池终端电压达到电池供电系统运行的最小值时立即准确预测剩余电量。IT-DZT 增强了无人机、机器人、电动工具和 AI 增强型便携式电子产品等各种应用的性能监测。

表 7-1 中显示了 IT-DZT 和 IT 在稳定和动态负载下的性能比较。要确定某个系统是否受益于 IT-DZT，请联系 TI 代表。

表 7-1. IT-DZT 和 IT 的比较

负载	IT-DZT			IT			CEDV		
	电阻估算	健康状况	RemCap	电阻估算	健康状况	RemCap	电阻估算	健康状况	RemCap
稳定	精确	是	是	精确	是	是	固定为新的电芯值	精确度随老化而下降	精确度随老化而下降
有脉冲	<10% 最坏情况下的误差与 SOC 和 T	是	是	<100% 最坏情况下的误差与 SOC 和 T	可能具有受限电流脉冲形状	否	<100% 最坏情况下的误差与 SOC 和 T	可能具有受限电流脉冲形状	否

8 参考资料

- 德州仪器 (TI)、用于动态负载 (EPOS) 的 Impedance Track™ 监测计配置 应用手册
- 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 应用手册
- 德州仪器 (TI)、适用于新手的 Impedance Track™ 电量监测计 应用手册

English Document: SLUAB20
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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出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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司