

利用反向升压电池充电器优化 USB-C 电源架构

摘要

USB Type-C®与 USB Power Delivery (USB-PD) 3.1 的快速普及, 正在显著改变移动计算系统中的供电方式。随着 Extended Power Range (EPR)支持最高 240W (48V/5A), USB-C 现已能够为高性能笔记本电脑及各类外设提供电力。本文概述了传统 NVDC 降升压充电架构, 并介绍了瑞萨基于 RAA489800 双向降升压控制器与电池充电器 IC (如 RAA489110 / RAA489118) 构建的解决方案。这些方案可实现 Hybrid Power Buck-Boost (HPBB)工作模式, 有助于提升多端口 USB-C 设计的效率、灵活性和系统扩展能力。

目录

摘要	1
介绍	2
传统 NVDC 降升压充电拓扑	2
Hybrid Power Buck-Boost(HPBB)架构.....	4
瑞萨 RAA489110”Combo”降升压电池充电器简介	5
瑞萨设计支持工具	8
结论	9
参考资料	9
修订历史	9

介绍

USB Type-C®端口是由 USB Implementers Forum^[1] (USB-IF) 标准化的规范, 正在显著重塑供电与连接方式, 尤其是在笔记本电脑、平板电脑等移动计算平台中。传统设计通常配备一个用于外部电源适配器的专用 DC 输入端口, 并由电池充电器 IC 同时负责电池充电和系统供电管理。

近年来, 随着采用 USB Type-C®端口和 USB Power Delivery (USB-PD), 电源、数据与视频功能正加速走向一体化。不同于传统仅限固定 5V 供电的 USB 端口, USB-PD 支持宽范围、动态且可编程的电压协商。随着 USB-PD 3.1 对 Extended Power Range (EPR)的支持, 系统可实现 5V 至 48V、最大 5A, 即最高 240W 的供电能力。此外, 还引入了 Programmable Power Supply (PPS)以实现更精细的电压调节、双向功率流以支持灵活的源/汇切换, 以及 Fast Role Swap (FRS)以实现无缝电源切换。凭借这些能力, 单个 USB-C 端口即可高效为高性能计算设备、外接显示器和各类配件供电。

因此, USB Type-C®正在快速取代现有充电端口, 并通过基于标准规范的统一电源架构, 帮助简化系统设计并提升用户体验。与此同时, 这一演进也对电源管理方案提出了更高要求, 需要其能够支持更高功率、更宽电压范围以及多端口配置。

传统 NVDC 降升压充电拓扑

在 USB-C 协议下, 电池充电系统需要处理宽范围的输入电压(V_{in}), 其值可以低于或高于电池组电压及系统总线电压。因此, 降升压充电器是最合适的选择。图 1 给出了传统 Narrow Voltage DC(NVDC)四开关降升压充电拓扑的简化示意图。该 NVDC 充电器由构成降升压充电器的四个开关 FET 以及位于电池与系统电压总线 V_{sys} 之间的一个 BFET 组成。降升压充电器的输入既可以来自专有 AC 适配器, 也可以来自 USB-C 端口。

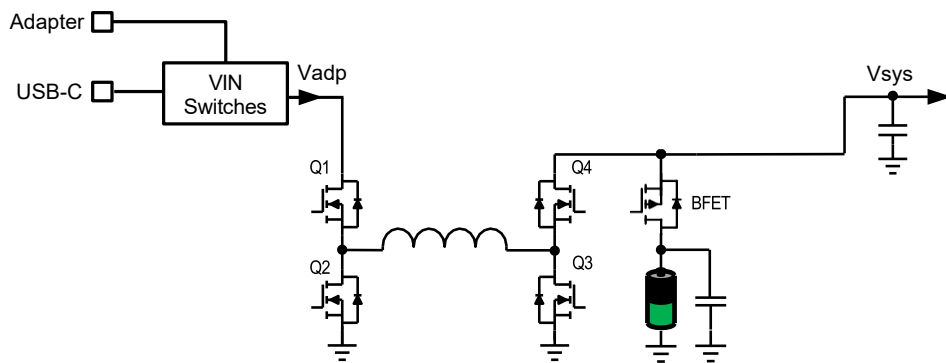


图 1. USB-C 传统 NVDC 降升压充电拓扑

图 2 展示了输入电源供电时的功率路径。在该模式下，共有三种工作场景。

- i. 当电池已充满时，降升压充电器会关闭 BFET。此时，降升压充电器将 V_{sys} 调节到目标电压，并向系统供电。
- ii. 当电池未充满且降升压充电器正在给电池充电时，BFET 处于导通状态。在涓流充电模式下，BFET 工作在线性区，其行为类似于线性稳压器(LDO)，从而将 V_{sys} 控制在目标电压。当充电器工作在 CC 或 CV 模式且 BFET 完全导通时 (假设 BFET 上没有压降)， V_{sys} 等于 V_{bat} 。此时，在输入功率大于系统功率的前提下，输入功率 = 系统功率 + 电池充电功率。
- iii. 无论电池是否处于充电状态，只要系统功率超过输入功率， V_{sys} 就会出现压降。通常，当 $V_{sys} < V_{bat} - V_{drop}$ (其中 V_{drop} 表示体二极管压降，典型值约为 0.7V) 时，BFET 会开始导通。或者，也可以通过更高级的控制方式提前导通 BFET，以支撑 V_{sys} 。无论采用哪种方式，电池都会放电，其输出功率与输入功率叠加后共同为系统供电。

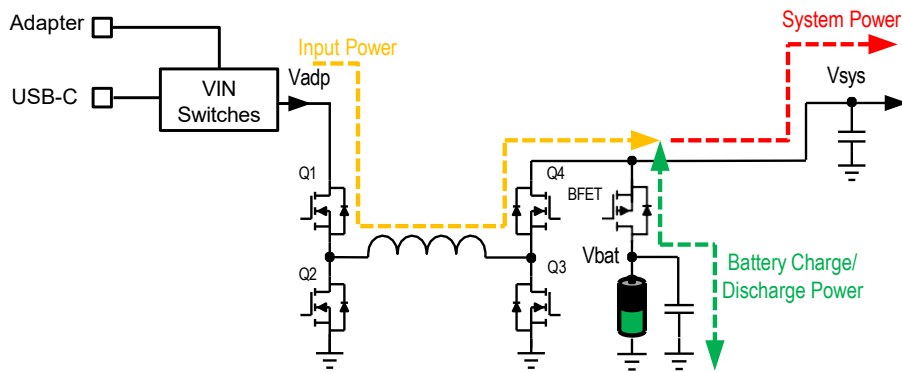


图 2. 包含输入电源的 NVDC 降升压充电功率路径

图 3 展示了仅由电池供电时的功率路径。在该模式下，BFET 会被强制导通。由于电池始终向系统供电，因此该模式相比前述模式更为简单。此时， V_{sys} 等于 V_{bat} 。

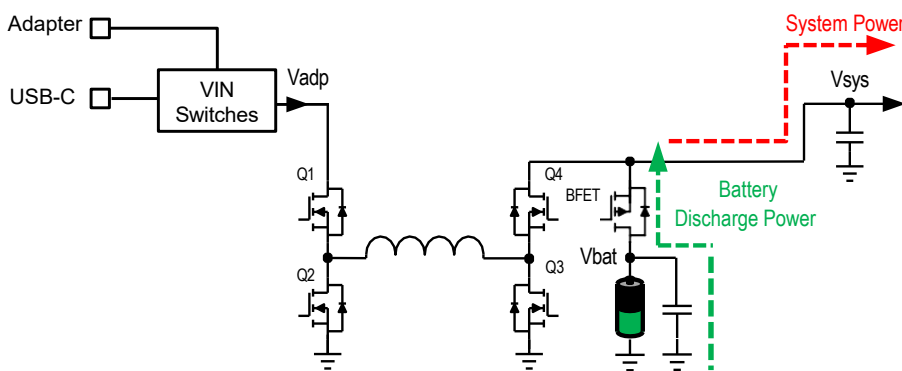


图 3. 电池供电模式下的 NVDC 降升压充电功率路径

NVDC 架构的一个典型特点是，所有功率都需要经过降升压充电器处理，因此不可避免地会产生由 MOSFET 开关损耗、导通损耗，以及电感磁芯损耗和铜损等带来的功率损耗。电感不仅要处理系统总功率，还要承担电池充电功率，因此需要选用更大规格的器件，进而导致整体尺寸更容易增大。基于这一原因，NVDC 架构通常更适合 60W 以下的中低功率系统。另一方面，NVDC 架构的优势在于控制方式相对简单。即使系统进入涡轮模式、系统功率需求超过适配器可提供的功率，充电器通常也无需额外复杂控制，只需进行适配器电流控制即可。电池会通过 BFET 自然放电，并自动为系统补充功率。

Hybrid Power Buck-Boost(HPBB)架构

图 4 展示了 HPBB 电池充电器架构。在该模式下，输入功率不再经过降升压充电器，而是通过旁路 FET 直接传输。因此，与 NVDC 模式相比，可显著降低功率损耗。降升压充电器仅处理电池的充电与放电功率，因此该架构无需使用大尺寸电感。

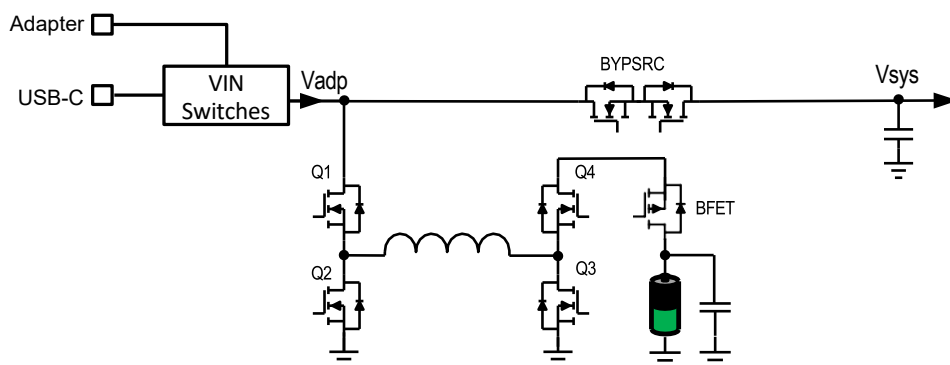


图 4. 瑞萨 HPBB 降升压充电器架构

在存在输入电源时，有两种工作场景。

- i. 输入功率 > 系统功率：在这种情况下，降升压充电器不会向系统供电。若电池组已充满，则进入待机模式；否则对电池进行充电。图 5 展示了该场景下 HPBB 模式的功率路径。

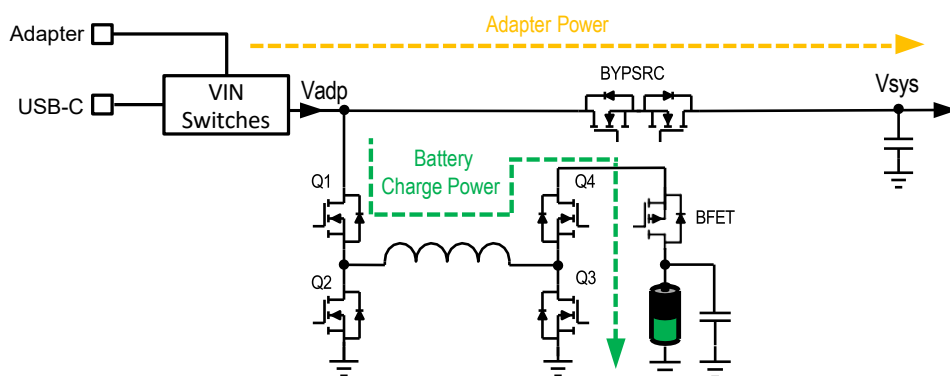


图 5. HPBB 模式下的功率路径 (输入功率 > 系统功率)

- ii. 输入功率 < 系统功率: 在这种情况下, 电池需要放电, 降升压充电器以反向工作方式将能量从电池传送到 V_{adp} 侧。电池功率会与输入功率叠加, 共同向系统供电。该模式也称为“Reverse Turbo-Boost”模式, 其功率路径如图 6 所示。

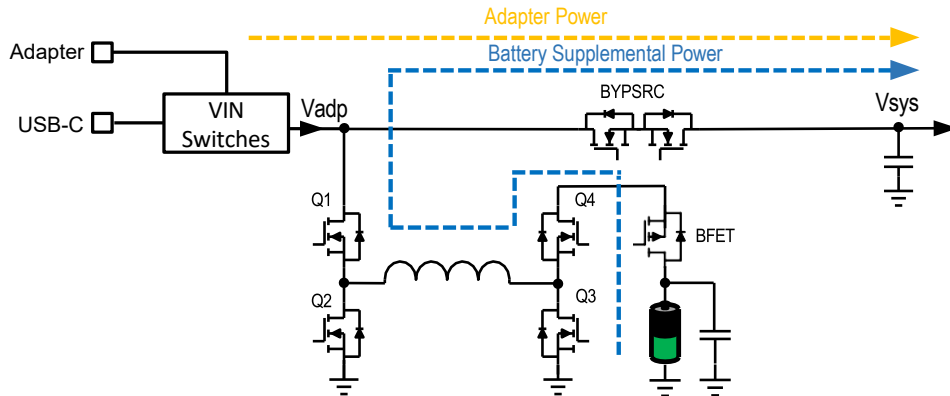


图 6. “Reverse Turbo-Boost”模式下的瑞萨降升压充电器

瑞萨 RAA489110^[2]“Combo”降升压电池充电器简介

RAA489110 是瑞萨基于 ISL9241 系列打造的下一代降升压充电器。同时支持 NVDC 和 HPBB 两种架构, 可在 USB Type-C 供电应用中提供更高的设计灵活性与更优的性能表现。

NVDC 模式下, RAA489110 可自动在适配器和电池之间切换, 作为系统电源的供给来源。此外, 在 NVDC 涡轮模式下, 器件可导通 BGATE FET, 将适配器电流限制在设定上限, 并由电池补足缺口功率, 从而维持系统持续运行。

RAA489110 在 HPBB 模式下支持多种工作模式, 包括旁路操作、带充电的旁路操作和反向涡轮增压, 可灵活适应各种应用场景。

RAA489110 同时兼容 HPBB 与 NVDC 两种架构, 有助于提升系统设计灵活性并优化整机性能。这两种工作模式可由嵌入式控制器(EC)的主机固件通过 SMBus/I2C 动态配置, 因此能够在 AC 适配器、USB Power Delivery 端口输入(含 EPR)等不同供电条件之间平滑切换并实现无缝适配。

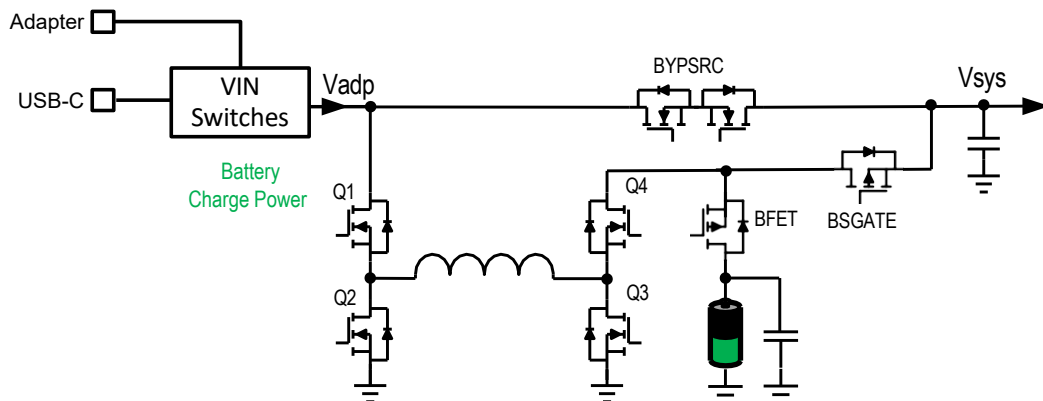


图 7. RAA489110 降升压充电器，同时支持 NVDC 与 HPBB 两种架构

RAA489110 采用全 NFET 架构，在提升效率并优化 BOM 成本的同时，实现充电功能、系统总线电压控制以及保护功能。借助瑞萨先进且专有的 R3™ 技术，该器件即使在轻负载条件下也能提供高效率充电模式。此外，其可重构的控制与补偿架构可在使用更小型电感的同时，对不同功率等级下的效率进行优化。

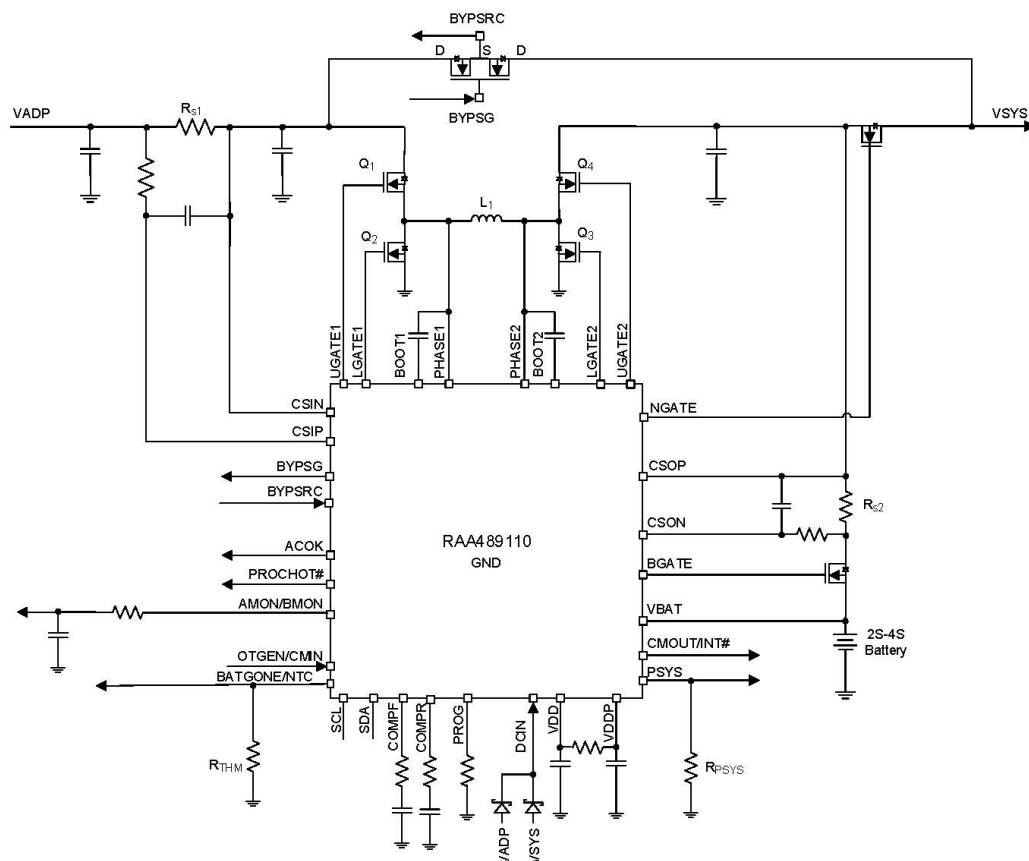


图 8. RAA489110 降升压充电器典型应用电路图

RAA489110 可接受来自多种 DC 电源的输入功率 (如传统适配器、旅行适配器以及 USB Type-C 供电端口等)，并可安全地为最多 4 节串联的锂离子电池组充电。该器件还支持带自动充电终止 (EOC) 功能的自主充电。在 HPBB 模式下，通过固件控制的旁路工作方式，适配器可直接为系统供电。

RAA489110 支持从 2 至 4 节串联电池组向适配器端口进行降压、升压或降升压工作。因此, 可支持包含 Programmable Power Supply (PPS)和 Extended Power Range (EPR)在内的 USB Type-C Power Delivery (USB-PD)输出配置。RAA489110 可在仅电池、仅适配器或两者同时接入的状态下工作, 系统电力可由适配器、电池或二者共同提供。面向符合 Intel IMVP 的系统, 器件内置 System Power (PSYS)监测功能, 可通过模拟信号输出整个平台的功耗信息。PSYS 输出可连接多种 IMVP 核心稳压器, 并支持符合 IMVP 规范的电源域配置。此外, 器件还支持 processor-hot (PROCHOT#)监测与 Supplemental Mode, 通过将电池电压维持在规定的最低值以上, 以满足 Intel Vmin Adaptive Protection (VAP)的要求。此外, 器件支持 SMBus/I2C 串行通信, 可灵活配置关键参数, 从而实现高度可定制的方案。

RAA489110 可持续监控运行状态, 并通过中断方式上报故障和告警。其内置 8 位 ADC, 可采集包括温度(PCB 与结温)、适配器电流/电压、电池充放电电流以及系统总线电压等在内的关键系统遥测参数。

RAA489110 采用可重构充电架构, 具备很高的灵活性, 可适配包括多 USB Type-C 端口设计在内的多种系统配置。通常每个器件对应一个 USB-C 端口, 但通过合理的系统级设计, 也可应用于多端口 USB-C 系统。RAA489110 支持包含 Programmable Power Supply(PPS)和 Extended Power Range (EPR)在内的 USB Power Delivery (USB-PD), 可实现符合规范且具备良好扩展性的 USB-C 电源解决方案。

RAA489110 的输入电压范围为 3.9V 至 30V, 系统/电池输出电压范围为 3.9V 至 18.304V, 适用于 2 至 4 节串联电池组。器件支持最高 20V 输出的 On-The-Go(OTG)工作模式, 并可配置为在无需与嵌入式控制器通信的情况下, 通过自动充电终止(EOC)实现自主充电。当电池电量较低时, 器件可自动检测并切换至涓流充电模式。此外, 还支持可编程的两级适配器电流限制功能, 并提供用于电量计校准的 battery learn mode。通过 SMBus 或 I2C 可配置各项功能, 从而便于针对不同系统设计进行优化。

瑞萨设计支持工具

评估板 / 用户指南

RAA489110 提供配套评估板和详细的用户指南, 便于客户开展测试与评估。图 9 展示了评估板的外观。

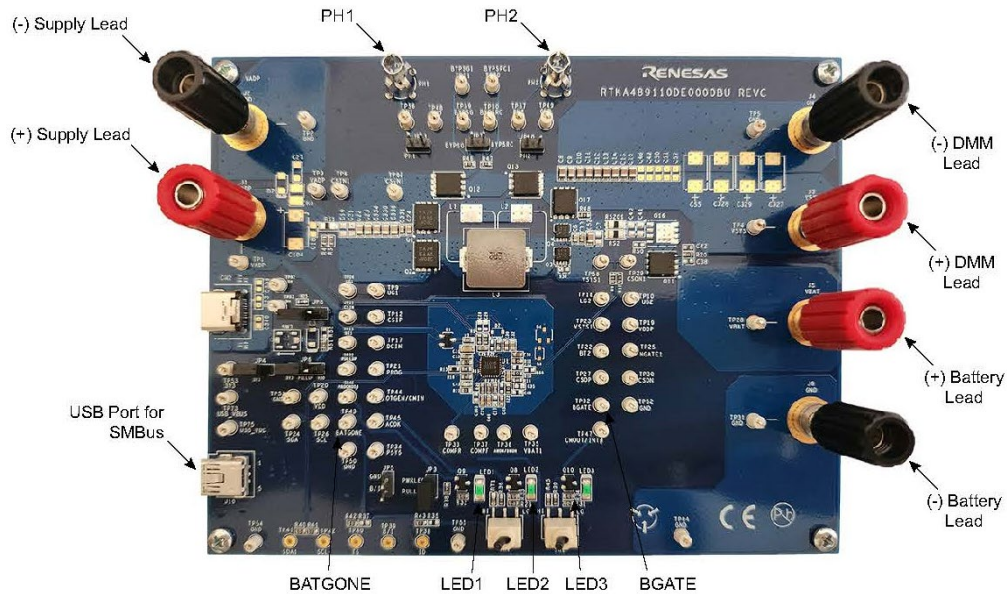


图 9. RAA489110 评估板

RAA489110 GUI

RAA489110 GUI 软件可加快电池充电器设计的导入、评估、优化和调试过程。用户可将其连接至开发板, 对各类系统参数和阈值进行设置。图 10 展示了 RAA489110 GUI 软件界面示例。

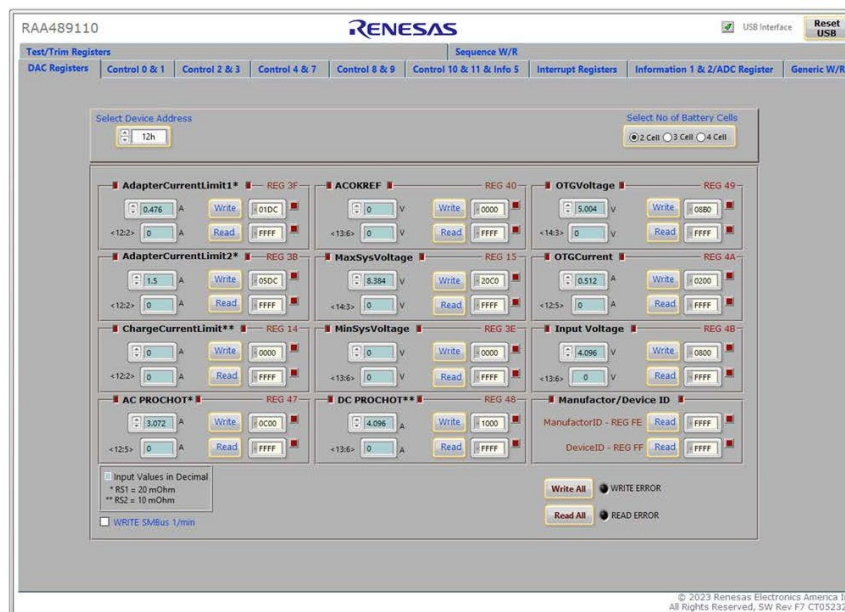


图 10. RAA489110 GUI 软件界面截图

更多资料

如需了解瑞萨提供的更多电池充电器设计在线资料, 请参阅以下内容。

<https://www.renesas.com/zh/products/power-management/battery-management/battery-charger-ics>

结论

本文概述了适用于笔记本电脑等消费类移动计算设备的先进电池充电拓扑及其工作原理。电池充电器不仅负责给电池组充电, 还承担着管理从适配器到计算系统整体电力流的关键任务, 因此在移动设备电源管理中至关重要。在计算系统中, 电池充电器需要与嵌入式控制器(EC)等系统管理组件协同工作, 以高效响应系统的功率需求。

RAA489110 通过同时支持 NVDC 和 HPBB 两种架构, 提供了很高的设计灵活性, 使设计人员能够根据应用需求动态选择最合适的工作模式。此外, 它与包括 ISL9241 系列在内的现有瑞萨充电器具有较高的寄存器兼容性, 有助于降低不同瑞萨充电器平台之间迁移设计时的开发负担。进一步来说, 面向 NVDC 架构开发的固件, 只需进行很少的修改即可适配 HPBB 工作方式, 从而有助于减少面向多个计算平台进行开发与验证所需的工作量。

参考资料

- [1] USB Implementers Forum www.usb.org
- [2] Renesas RAA489110 <https://www.renesas.com/zh/products/RAA489110>

修订历史

版本	日期	说明
2.00	Jun 19, 2026	USB标准相关内容与产品信息已更新
1.00	Oct, 2018	初版

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

RENESAS ELECTRONICS CORPORATION AND ITS SUBSIDIARIES ("RENESAS") PROVIDES TECHNICAL SPECIFICATIONS AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD-PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for developers who are designing with Renesas products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate products for your application, (2) designing, validating, and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, or other requirements. These resources are subject to change without notice. Renesas grants you permission to use these resources only to develop an application that uses Renesas products. Other reproduction or use of these resources is strictly prohibited. No license is granted to any other Renesas intellectual property or to any third-party intellectual property. Renesas disclaims responsibility for, and you will fully indemnify Renesas and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, or liabilities arising from your use of these resources. Renesas' products are provided only subject to Renesas' Terms and Conditions of Sale or other applicable terms agreed to in writing. No use of any Renesas resources expands or otherwise alters any applicable warranties or warranty disclaimers for these products.

(Disclaimer Rev.1.01)

Corporate Headquarters

TOYOSU FORESIA, 3-2-24 Toyosu,
Koto-ku, Tokyo 135-0061, Japan
www.renesas.com

Contact Information

For further information on a product, technology, the most up-to-date version of a document, or your nearest sales office, please visit www.renesas.com/contact-us/.

Trademarks

Renesas and the Renesas logo are trademarks of Renesas Electronics Corporation. All trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.