

Design Guide: TIDA-050042

1-6 节、高达 1.5A 锂离子电池充电器参考设计，具有开关恒流电源



说明

此参考设计展示了适用于中端或低端扫地机器人的成本优化型板载电池充电器解决方案，其充电电流高达 1.5A 且布局面积小，充电电压精度为 $\pm 3\%$ ，充电电流精度也为 $\pm 3\%$ 。该设计具有稳定、平滑的预充电至 CC（恒流）和 CC 转 CV（恒压）充电曲线，已使用 4S2P 锂离子电池包完成评估。

资源

TIDA-050042	设计文件夹
TPS92200	产品文件夹
TLV9002	产品文件夹
TLV7021	产品文件夹
TVS3300	产品文件夹

特性

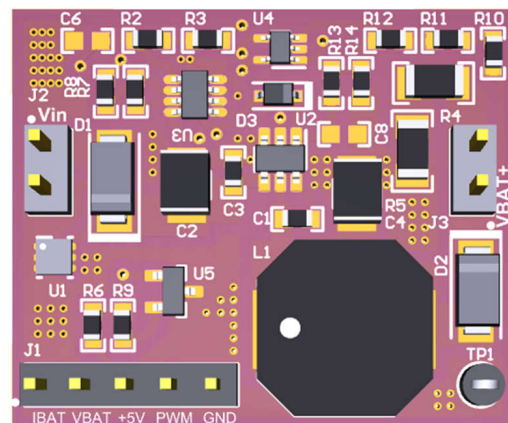
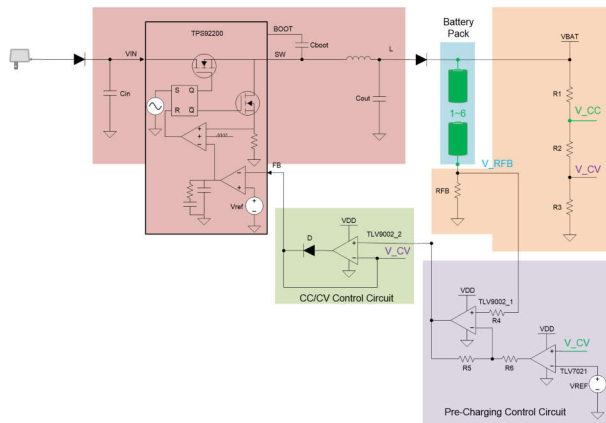
- 广泛支持 4V 到 30V 的输入电压范围（1 至 6 节串联锂离子电池充电器解决方案）
- 最大充电电流高达 1.5A
- 通过外部电路实现纯硬件可配置的 3 阶段充电
 - 预充电、CC 和 CV
 - CC 和 CV
- 纯模拟控制拓扑
 - 用简单模拟电路实现预充电阶段
 - 通过内部补偿和简单的控制逻辑实现从 CC -> CV 的平滑、稳定转换

应用

- 扫地机器人
- 无线真空吸尘器
- 类人机器人



请咨询 TI 公司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

扫地机器人也被称为机器人真空吸尘器，已经存在大约 23 年，它正在变得更加智能和自动化。人们期望机器人能够在需要再次充电之前执行完整的清洁循环。随着扫地机器人中添加的功能（例如拖地、音频交互、导航厚地毯和爬升阈值）越来越多，整个清洁周期的功率要求越来越高，因此电池容量越来越大，通常从 2600mAh 到 5200mAh 不等。

同时，这也提高了对电池充电器的要求。以下各项列出了车载充电器的一般要求，这意味着充电器电路在机器人的主板上实现，广泛用于全球几乎所有品牌的扫地机器人：

- 高充电电流
- 具有成本效益
- 小尺寸
- 高充电电压精度
- 高充电电流精度
- 易于设计

大多数车载充电都通过分立式解决方案实现。最具代表性的是使用系统微控制器 (MCU) 作为数字控制器的异步降压拓扑充电器。图 1-1 展示了此解决方案的方框图。

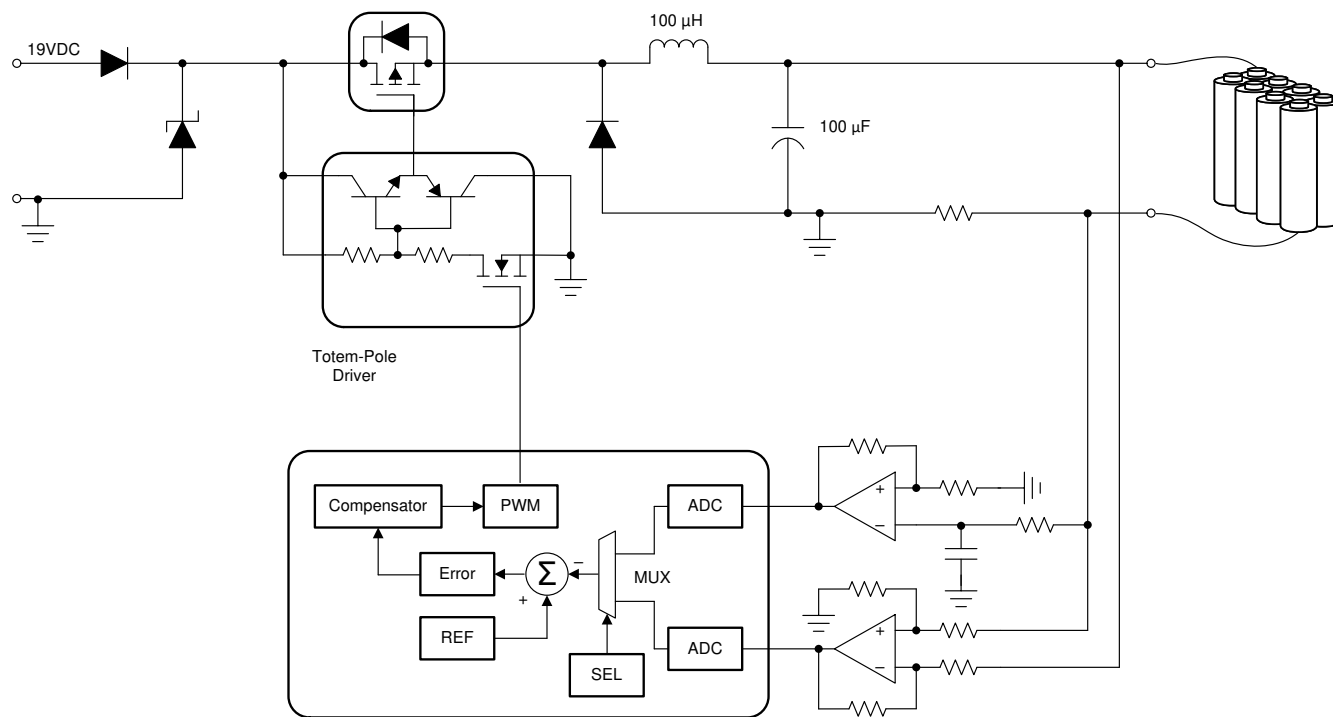


图 1-1. 由系统 MCU 控制的异步降压拓扑充电器

该解决方案是一款数控开关模式电源 (SMPS)；**数字控制**是指采样反馈信息和闭环环路，该误差放大器被模数转换器 (ADC) 和数字滤波器取代，补偿器采用数字信号处理技术来构建 PWM 的控制力度。

以下各项列出了此解决方案的数个优缺点：

- 由于 ADC 采样率有限和奈奎斯特香农采样定理，开关频率有限，通常在 50kHz 到 100kHz 的范围内
- 需要较大的电感值和输出电容器来满足严格的输出电压调节要求，并且需要较大的尺寸来占用电路板面积
- 异步降压拓扑具有低效率和低热性能，受续流二极管功率耗散的影响时尤其如此
- 为了实现稳定的闭环并保持多个 MCU 资源占用的复杂数字信号处理技术（例如存储器、PWM、ALU、ADC），充电电压精度取决于 ADC 基准电压的精度，充电电压精度约为 $\pm 3\%$ 。

此参考设计在上述分立式解决方案及完全集成式解决方案之间开发了一种具有竞争力的解决方案。

1.1 主要系统规格

表 1-1 示出了板载充电器的典型要求和系统规格。

表 1-1. 主要系统规格

参数	规格
输入电压范围	17V 至 30V
串联电芯的数量	4S
充电电流	高达 1.5A
充电电压精度	$\leq \pm 3\%$
充电电流精度	$\leq \pm 3\%$
充电电压纹波	$\pm 0.023\%$
效率	$> 90\%$, 最高 95%
PCB 大小	3.0cm \times 2.5cm

2 系统概述

2.1 方框图

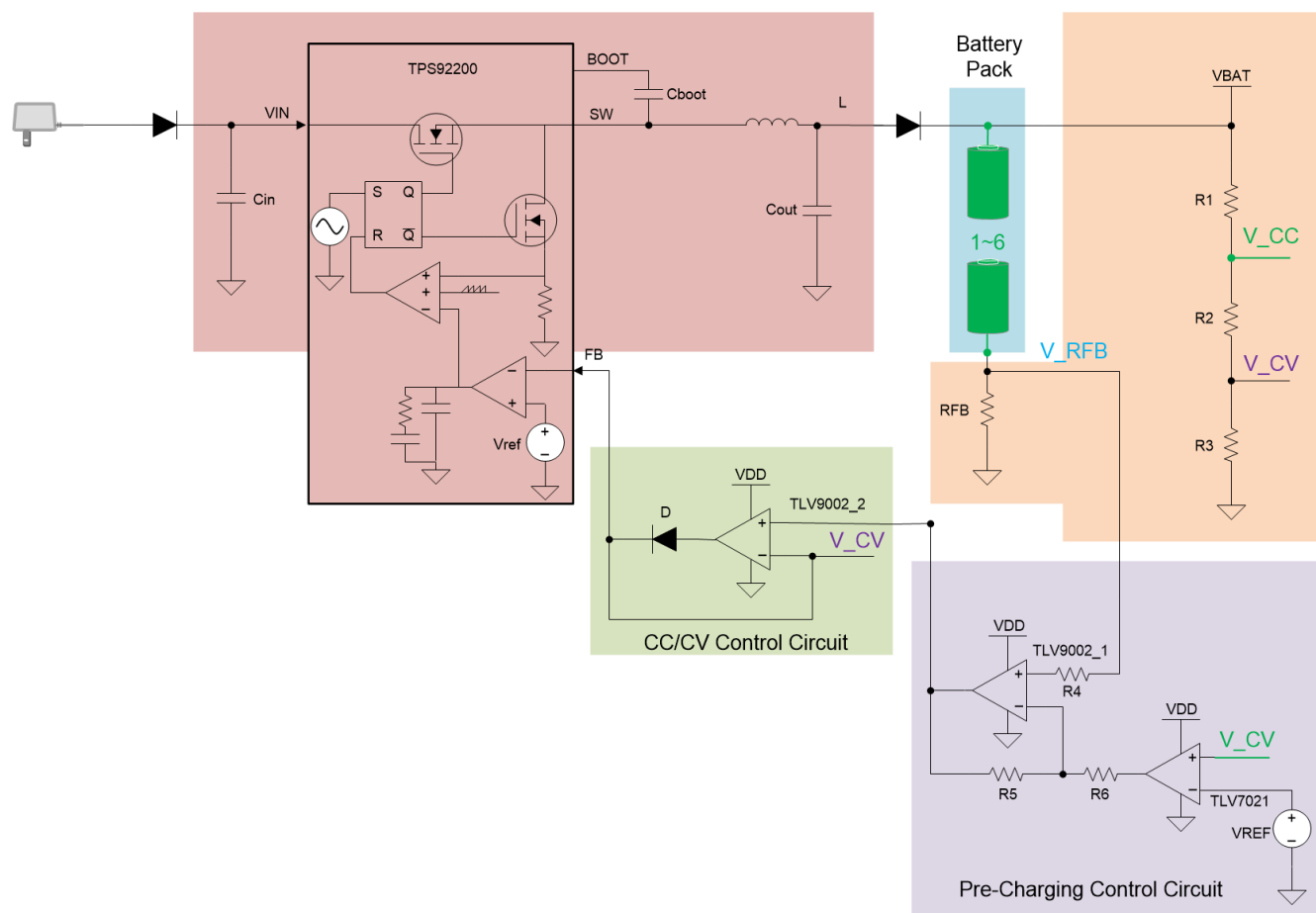


图 2-1. TIDA-050042 方框图

2.2 设计注意事项

此参考设计尝试通过权衡充电电压精度来优化系统 BOM 成本及充电电流容量。该解决方案实现了基于同步降压转换器的电池充电器 - TPS92200 器件集成了两个开关 FET 并具有内部环路补偿功能，并采用 SOT-23 封装，可实现高功率密度，并且在 PCB 上的占用空间非常小。模拟控制消除了 MCU 资源和软件工作负载，从而更易于实施和缩短设计周期。此解决方案使用 TLV9002 器件（提供高电流检测精度）及 TLV7021 器件（用于在预充电和恒流充电过程之间切换）实现简单的充电曲线 - 恒压级和恒流级。

2.3 重点产品

以下小节介绍了本参考设计使用的重点产品，包括其选型的主要特性。有关重点器件的详细信息，请参阅相关产品数据表。

2.3.1 TPS92200

TPS92200 器件是一款具有 30V 最大输入电压的 1.5A 同步降压 LED 驱动器。通过集成高侧和低侧 NMOS 开关，TPS92200 器件以超小的解决方案尺寸提供高功率密度和效率。TPS92200 器件使用峰值电流模式控制和全面内部补偿在各种运行条件下提供高瞬态响应性能。

由于 LED 驱动器具有恒定电流特征，因此该器件也可用于实施有竞争力的充电器解决方案。4V 至 30V 电源电压范围很适合使用通用交流/直流适配器或 USB 电源的 1 节至 6 节串联锂离子电池应用。

灵活的调光方法有助于提供各种电池充电器解决方案，其中包括具有较少外部元件的数字充电器解决方案和具有少量外部元件的纯硬件解决方案。

在安全和保护方面，TPS92200 器件可实现全面保护，包括 LED 开路、LED+ 接地短路、LED 短路、检测电阻开路和短路以及器件热保护。这些保护功能还可以增强电池包的安全性。

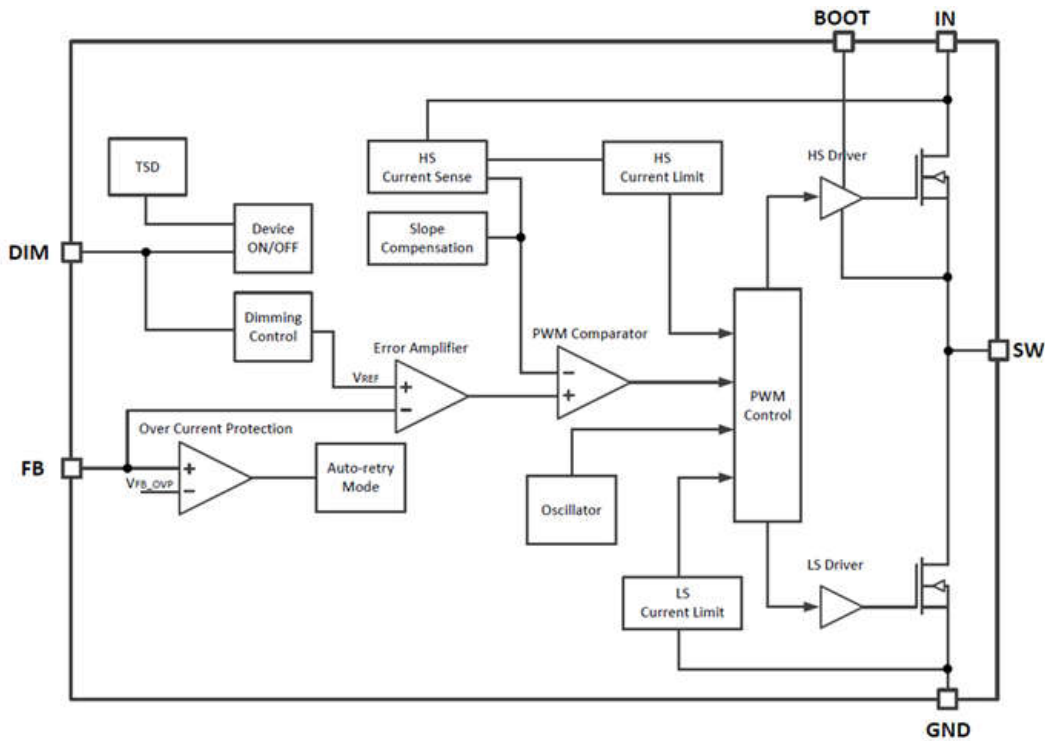


图 2-2. TPS92200 功能框图

2.4 系统设计原理

为了实现简化的充电曲线，电池充电器应具有预恒定充电控制 (Pre-CC)、恒定电流 (CC) 控制和恒定电压 (CV) 控制。TPS92200 器件实现了恒定频率峰值电流模式控制，可改善线路和负载瞬态。经过优化的内部补偿网络更大限度地减少了外部元件数量，并简化了恒定电压环路设计。

2.4.1 预充电控制

为了实现预恒定电流控制，设计需要设置预充电电压阈值。

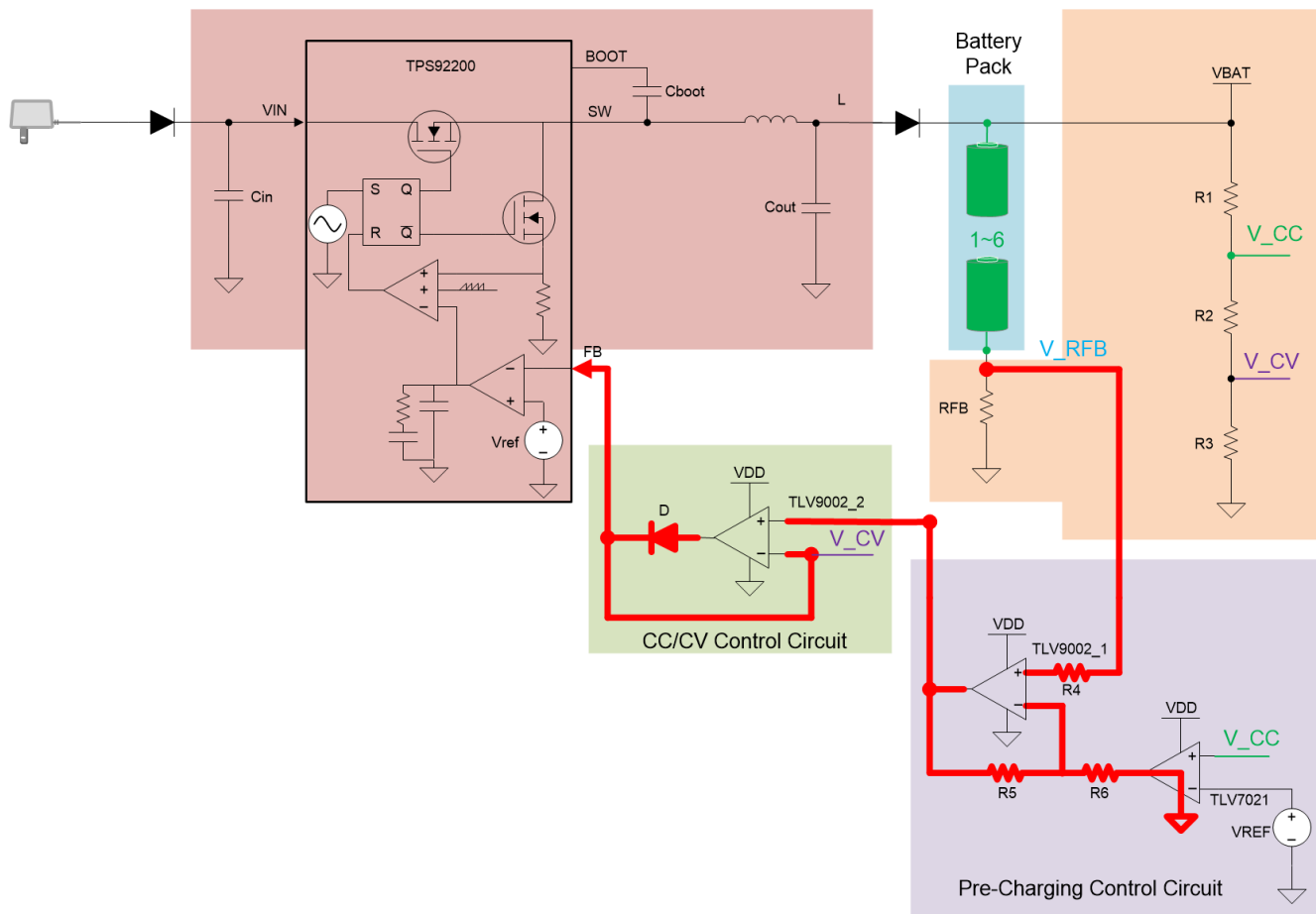


图 2-3. 预充电控制

VREF 可来自分压器或恒压源，例如 TL431。R1、R2 和 R3 用于检测电池电压，当电池电压符合公式 1 时，它将进入预充电模式，如图 2-3 所示。

$$V_{CC} = V_{BAT} * \frac{R1}{R1 + R2 + R3} \leq V_{REF} \quad (1)$$

对于预充电模式，TLV7021 输出低电平，TLV9002 1 放大器将检测到的电压从 RFB 产生，增益如公式 2 所示。

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R5}{R6} \quad (2)$$

由于电池未充满电，电池检测到的电压 V_{CV} 符合公式 3，这会导致 TLV9002_2 输出高电平，肖特基二极管导通至闭环路径。

$$V_{CV} = V_{BAT} * \frac{R1 + R2}{R1 + R2 + R3} < V_{ref} \quad (3)$$

- 其中是 TPS92200 的内部基准，99mV（典型值）。

预充电模式下的充电电流通过公式 4 计算。

$$I_{out} = \frac{V_{ref}}{Gain * R_{FB}} \quad (4)$$

当 V_{CC} 接近 V_{REF} 时，预充电模式结束。

2.4.2 恒定电流控制

当 V_{CC} 高于 V_{REF} 时，比较器 TLV7021 输出开路、TLV9002_1 的工作方式与不放大 V_{RFB} 的缓冲器类似。TLV9002_2 也可在闭环下工作，如图 2-4 中所示。

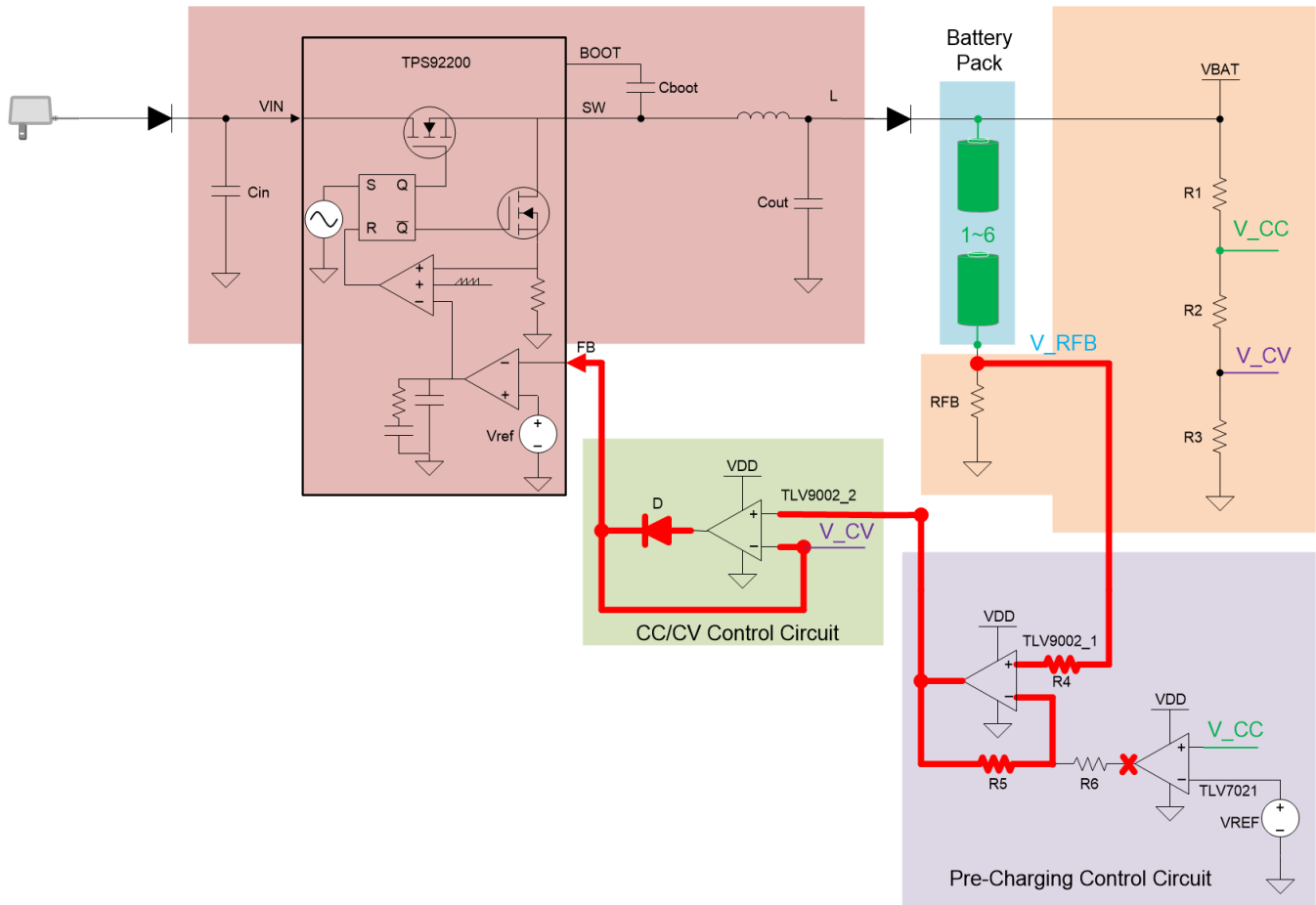


图 2-4. 恒流控制设计

恒流模式下的充电电流可通过公式 5 计算。

$$I_{out} = \frac{V_{ref}}{R_{FB}} \quad (5)$$

当 V_{CV} 接近 V_{ref} 时，恒流模式结束。

2.4.3 恒压控制

切换 CC 控制与 CV 控制一种经济高效且简单的方法是使用一个二极管来实现或逻辑功能。图 2-5 展示了此实现的方框图。

在充电过程中，VBAT 将增加，当 V_{CV} 等于 V_{ref} 时，TPS92200 将进入状态。输出电流将下降，TLV9002_2 输出为低电平，肖特基二极管将被阻断， V_{CV} 将直接调节，从而实现与传统直流/直流转换器类似的恒定电压控制。

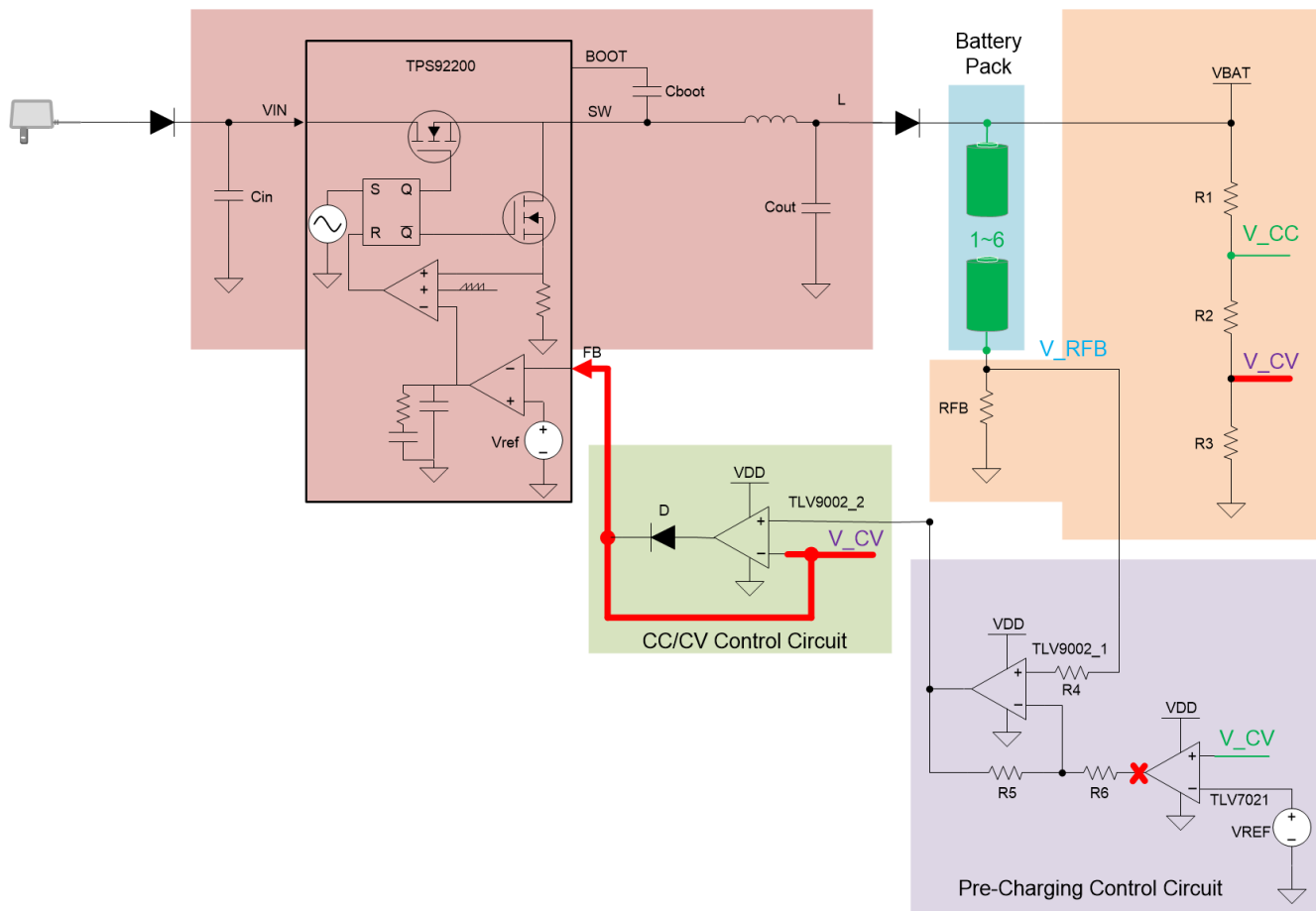


图 2-5. 恒压控制

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 所需硬件

图 3-1 显示了 TIDA-050042 设计的 PCB 概览，其中包含：

- 电源 (J2) 的两端子输入：该引脚用于连接源自前级 AC/DC 输出电压的直流电源。
- 输出电压的两端子输出 (J3)：此引脚用作该充电器的输出并连接到电池。
- 六端子连接器 (J1)：此连接器用于外部通信接口，引脚定义从左到右为：IBAT、VBAT、+5V、PWM 和 GND。IBAT 引脚是电流检测电路的输出，VBAT 是电压检测电路的输出，+5V 是运算放大器和比较器的电源。PWM 引脚是可选的，用于调节输出电流。

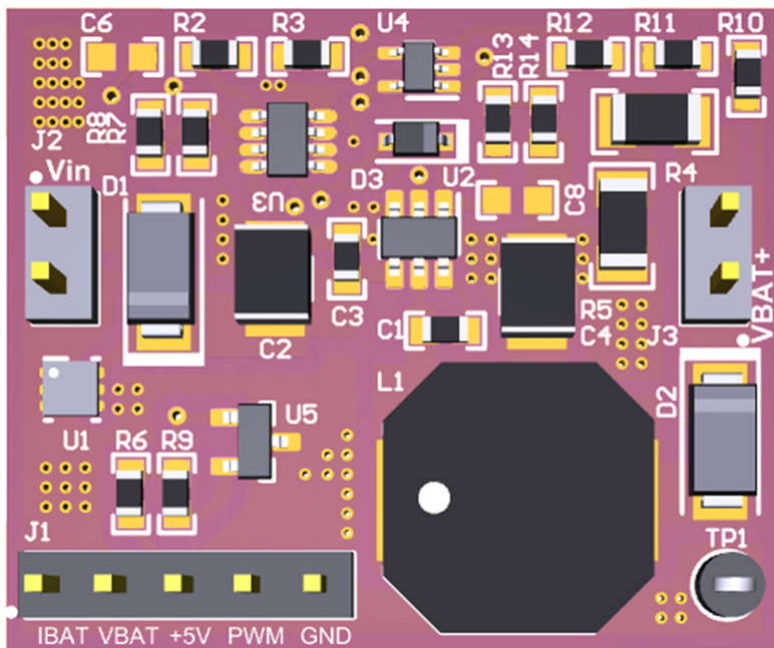


图 3-1. TIDA-050042 印刷电路板

3.2 测试和结果

3.2.1 测试设置

表 3-1. 测试环境列表

材料	用途	注释
直流电源	电源	30V、2-A 电源
直流电源	电源	6V、1A 电源
TIDA-050042 电路板	电池充电器板	----
电子负载	电池包仿真	CC、CV、CR 模式
4S2P 锂离子电池包	负载	带保护电路

以下步骤显示了如何于测试期间在实验室中设置测试平台：

1. 确保 TIDA-050042 电路板在空载时具备正确的输出电压
2. 连接电子负载并选择 CV 模式以便测试恒定输出电流
3. 连接电子负载并选择 CC 模式以便测试恒定输出电压

3.2.2 测试结果

3.2.2.1 预充电、CV 及 CC 模式稳态

图 3-2 示出了前置恒流 (预 CC) 模式的稳态。图 3-3 示出了恒流 (CC) 模式的稳态，图 3-4 示出了恒压 (CV) 模式的稳态。蓝色曲线 (CH4) 是输出电压，紫色曲线 (CH1) 是开关频率。CV 模式在以下条件下进行测试：16.5V 的输出电压及 0.5A 的输出电流；CC 模式在以下条件下进行测试：15V 的输出电压及 1.0A 的输出电流。

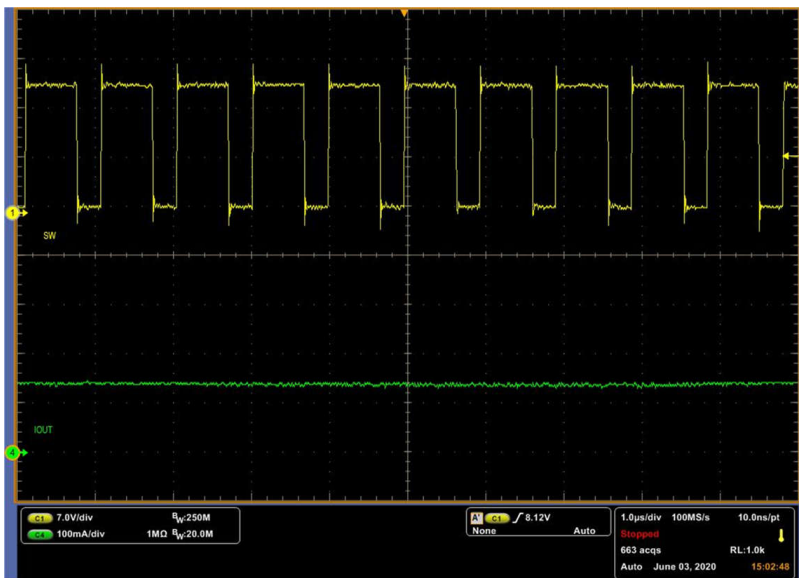


图 3-2. 预充电模式稳态

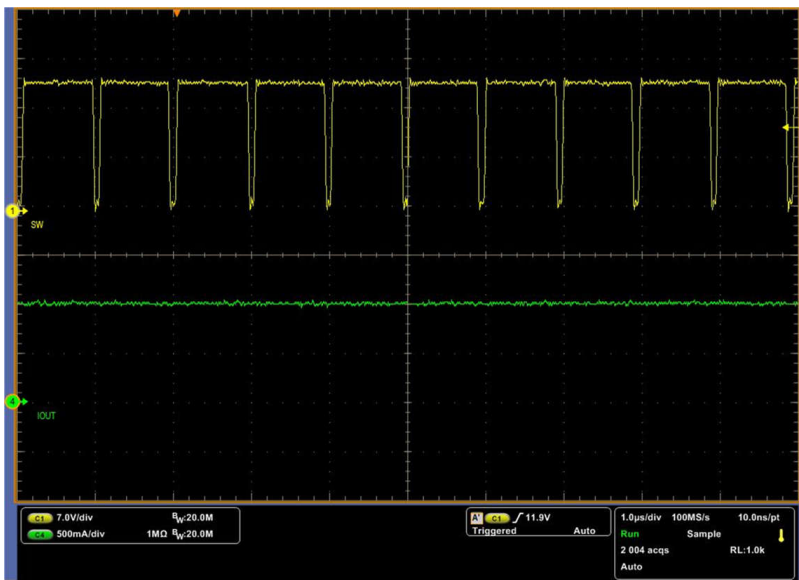


图 3-3. CC 模式稳态

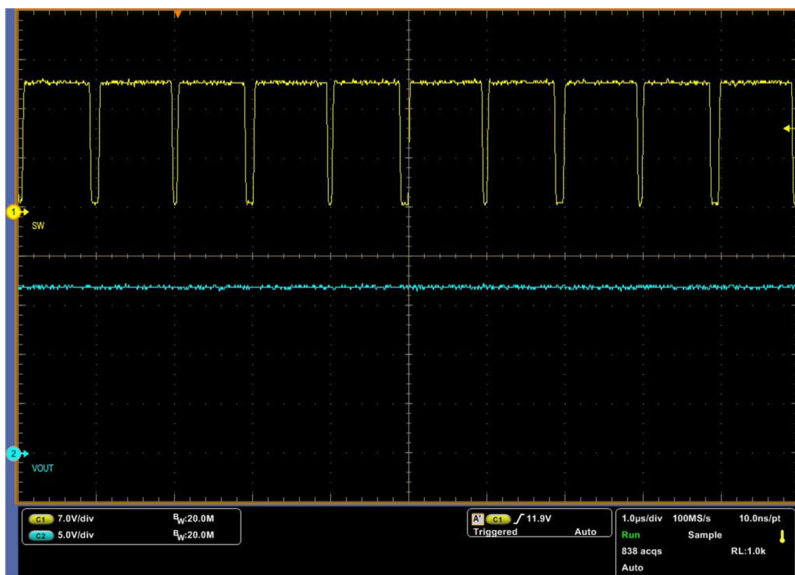


图 3-4. CV 模式稳态

3.2.2.2 CV 电压纹波及 CC 电流纹波

图 3-5 示出了 CC 模式的电流纹波，图 3-6 示出了 CV 模式的电压纹波。输出电压纹波小于 $\pm 20\text{mV}$ 。通过测量电流检测电路的输出电压来测试输出电流纹波，该电流纹波小于 $\pm 5\text{mA}$ 。

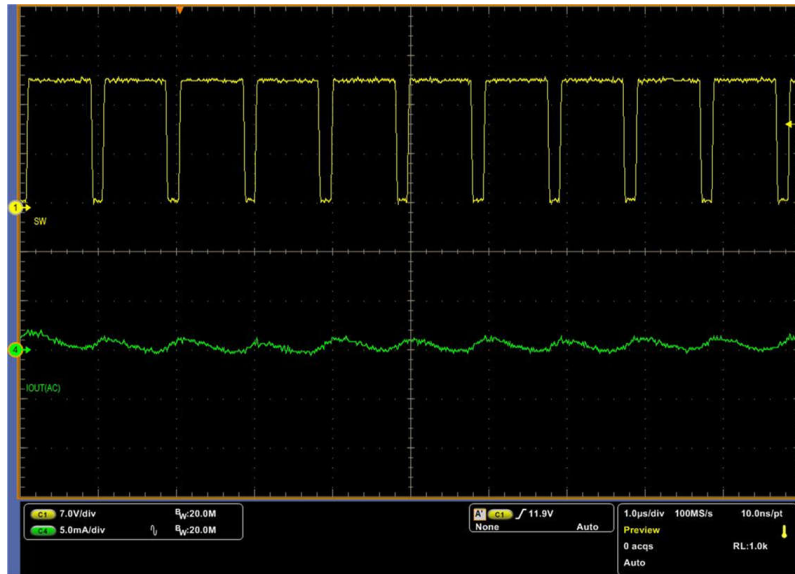


图 3-5. CC 模式电流纹波

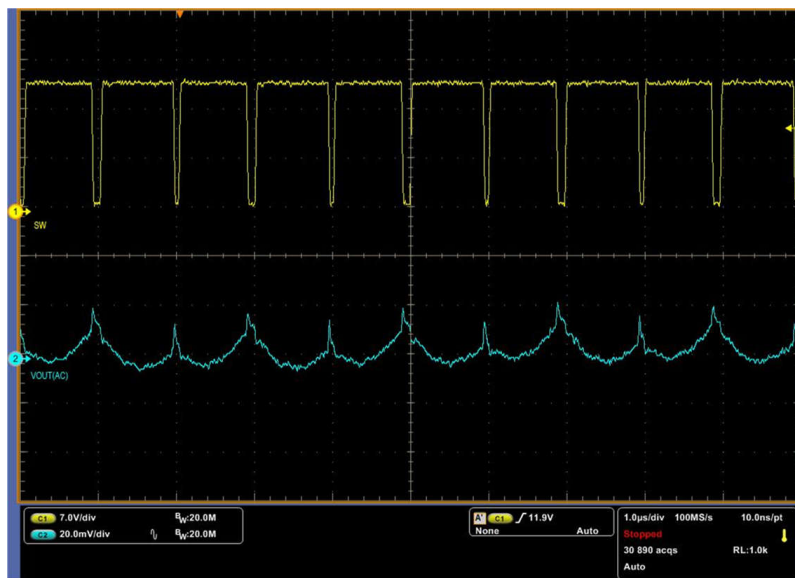


图 3-6. CV 模式电压纹波

3.2.2.3 效率测试

图 3-7 示出了电池充电器在 0.1A 至 1.0A 范围内的效率曲线。

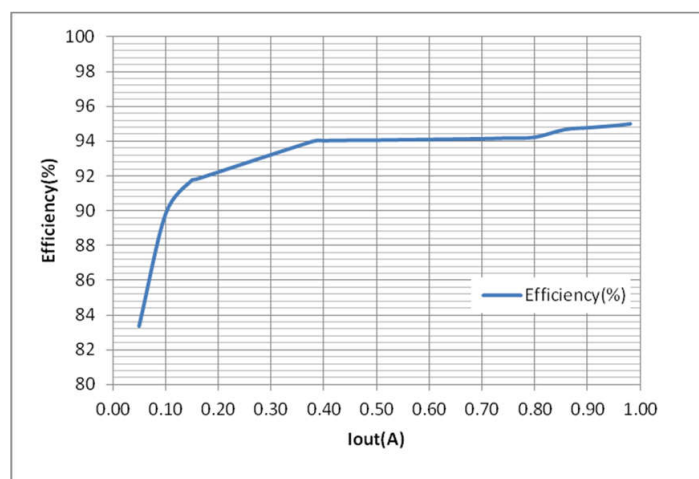


图 3-7. 效率与输出电流间的关系

3.2.2.4 热力测试

图 3-8 示出了电路板在持续运行 10 分钟后的热像图。TPS92200 器件上观察到的最高温度是 68.7°C。

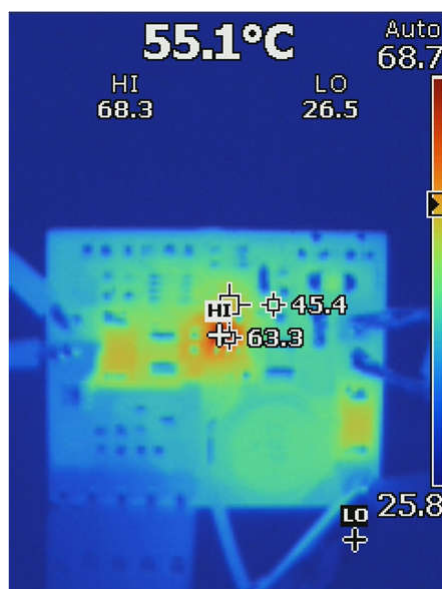


图 3-8. 热力测试

3.2.2.5 电压和电流闭环稳定性

图 3-9 示出了 TIDA-050042 参考设计的电压闭环稳定性性能，增益交叉频率为 730.92Hz，相位裕度为 99.9°，这意味着该控制电路稳定且具有足够的带宽。

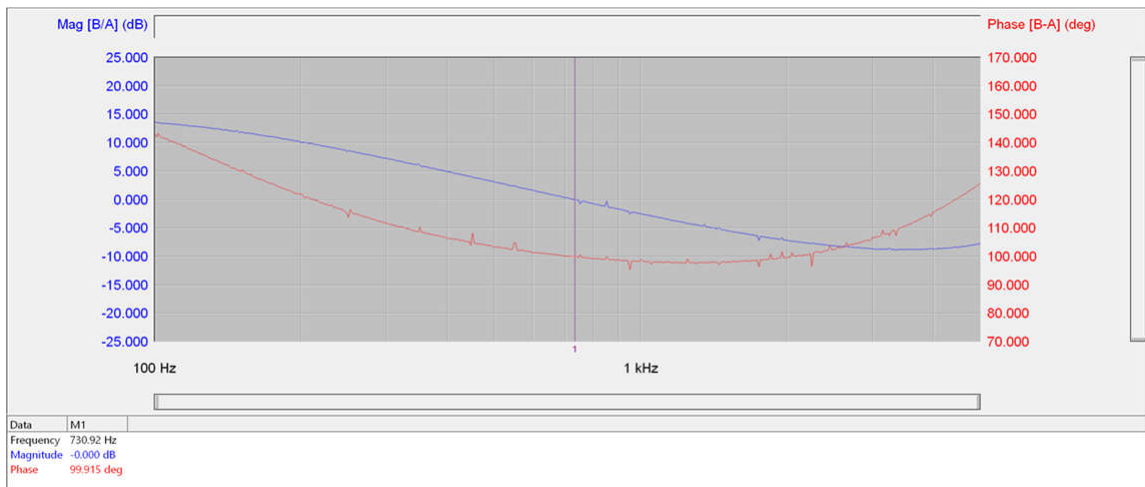


图 3-9. 电压开环稳定性

图 3-10 显示了 TIDA-050042 参考设计的电流闭环稳定性性能，增益交叉频率为 24.52kHz，相位裕度为 90.3°，这意味着该控制电路稳定且具有足够的带宽。

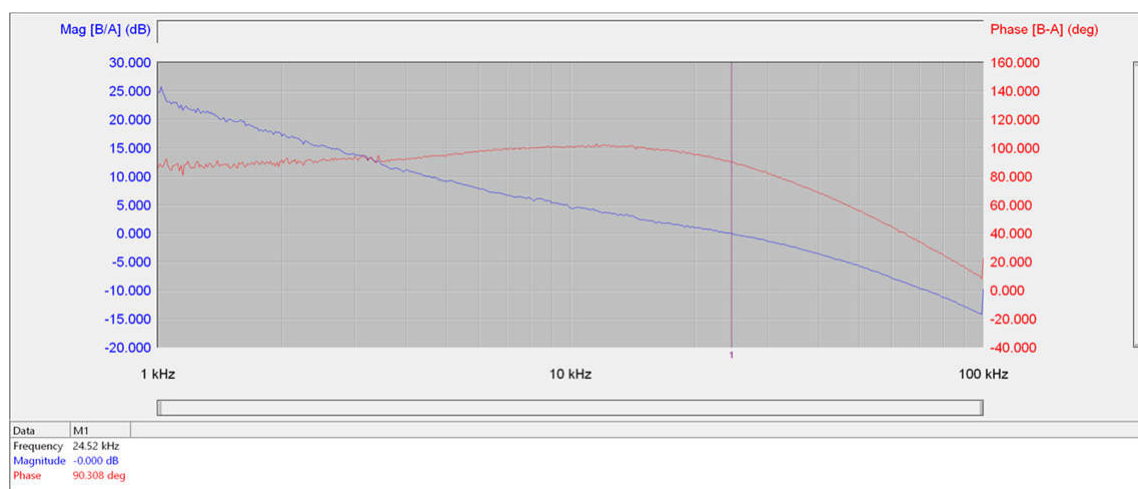


图 3-10. 电流开环稳定性

3.2.2.6 充电曲线

图 3-11 示出了该解决方案的充电曲线，负载使用具有保护电路的 4S2P 电池包。

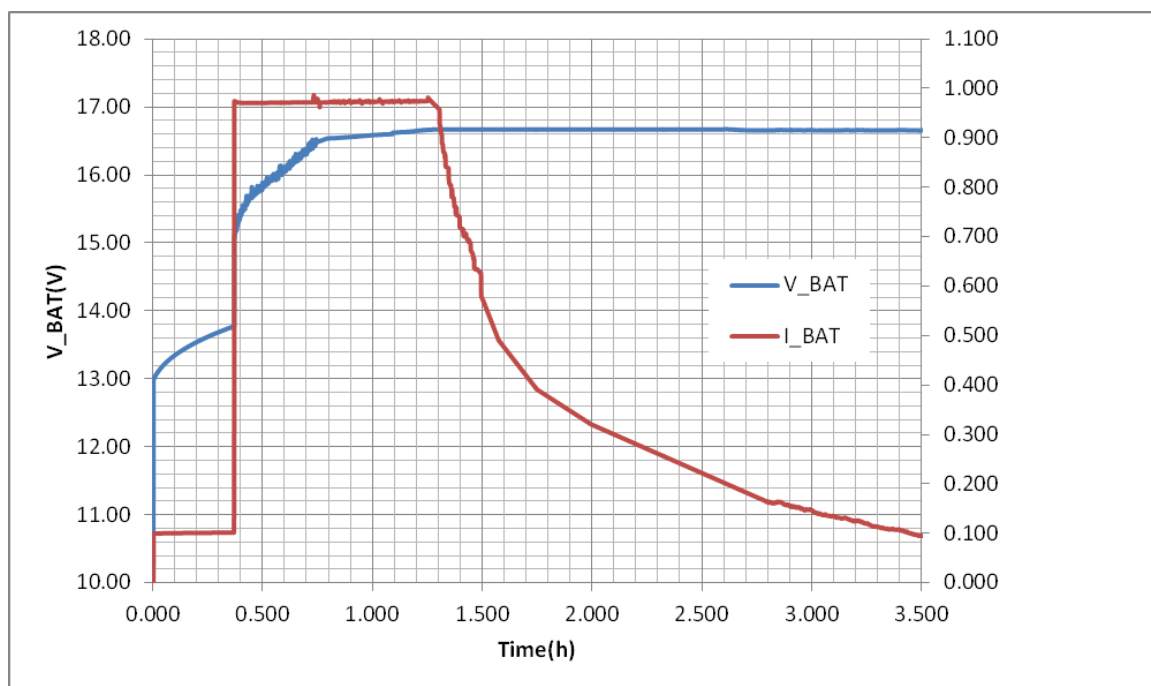


图 3-11. 充电曲线

充电曲线包括预 CC 模式、CC 模式和 CV 模式，预 CC 到 CC 和 CC 到 CV 之间的转换平稳稳定。

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-050042](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-050042](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-050042](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

要下载 Altium Designer® 工程文件，请参阅 [TIDA-050042](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-050042](#) 的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-050042](#) 中的设计文件。

5 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-050042](#) 中的设计文件。

6 相关文档

1. 德州仪器 (TI)，[TPS92200 4 V 至 30 V 输入电压、1.5A 输出电流同步降压 LED 驱动器 \(带灵活调光选项\) 数据表](#)
2. 德州仪器 (TI)，[TLV900x 适用于成本敏感型系统的低功耗、RRIO、1MHz 运算放大器数据表](#)
3. 德州仪器 (TI)，[TVS3300 33V 平缓钳位浪涌保护器件数据表](#)
4. [德州仪器 \(TI\) 具有开漏输出的低功耗、小尺寸比较器数据表](#)

6.1 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6.2 第三方产品免责声明

TI 发布的与第三方产品或服务有关的信息，不能构成与此类产品或服务或保修的适用性有关的认可，不能构成此类产品或服务单独或与任何 TI 产品或服务一起的表示或认可。

7 作者简介

Sean Zhou 是德州仪器 (TI) 的应用工程师，负责使用 LED 驱动器支持和开发适用于各种应用的参考设计解决方案。

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任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月