

数据中心 解决方案



超越一切可能™



访问: analog.com/cn/datacenter



目录

面向AI领域的 $\pm 400\text{V}/800\text{V}$ 热插拔保护与遥测技术	1
助力未来创新：适用于1/4砖电源的混合转换器—第1部分：优势	4
助力未来创新：适用于1/4砖电源的混合转换器—第2部分：性能	10
一次通过EMI合规性测试—第1部分：相关物理知识	14
一次通过EMI合规性测试—第2部分：PCB辐射示例	17
使用热插拔控制器增强系统可靠性	22
带耦合电感的多相降压转换器中关于输出电流和电压纹波的考量因素	29
一步转换为内核电压	37
48 V技术的魅力：系统级应用中的重要性、优势与关键要素	39
实现不间断能源的智能备用电池第一部分：电气和机械设计	44
实现不间断能源的智能备用电池第二部分：BBU微控制器的功能和操作	51
实现不间断能源的智能备用电池第三部分：电池管理系统	56
实现不间断能源的智能备用电池第四部分：BBU架的操作	60
实现不间断能源的智能备用电池第五部分：辅助电源系统	64

技术文章

面向AI领域的 $\pm 400\text{V}/800\text{V}$ 热插拔 保护与遥测技术

Donal McCarthy, 数据中心电源营销总监

摘要

随着GPU功耗的持续攀升，AI服务器环境中的供电需求不断增长，本文围绕此趋势展开讨论。文中重点阐述了供电架构从48V向800V的转型变化，并探讨了随着数据中心基础设施的演进，ADI在高压热插拔保护领域的持续创新成果。

数据中心热插拔控制器的未来发展

随着AI工作负载不断加重，服务器环境中的GPU催生了前所未有的供电需求，推动机柜级供电架构向800V转型。这种高压架构为系统保护与监控带来了新的挑战，尤其是在托盘带电插拔的过程中。为应对这些挑战，需要新一代热插拔控制器：不仅要具备管理高压浪涌电流的能力，还要能提供可靠的遥测功能，以支持系统诊断与安全防护。ADI公司在12V与48V热插拔技术领域是公认的领军企业，如今正将这方面的技术专长拓展至800V领域，以支持行业向高压架构转型。

为何800V架构至关重要？

在AI服务器基础设施中，有两大核心趋势正推动机柜级供电向更高电压转型。

- 1. GPU功耗持续攀升：**随着GPU的计算性能不断提升，其供电需求也在大幅增加。
- 2. 单机柜计算密度增高：**为实现大规模AI训练与推理场景下的性能最大化，并尽可能降低互联延迟，越来越多的GPU被整合到单个机柜中。这种共置方式通过缩短加速器之间的数据传输路径，不仅提升了带宽效率，还减少了通信开销。

为满足由此激增的机柜级供电需求，行业正逐渐转向分布式供电架构。在这种模式下，传统供电元件（如配电单元(PDU)、

电池备份单元(BBU)与电容单元(CU))不再部署在IT主机柜内，而是转移至相邻的供电侧柜(sidecar)中。这种分离设计不仅支持800V等更高电压的电力传输，还能腾出机柜内的宝贵空间，用于容纳更多计算资源。

现有的供电方式

AI机架采用48V汇流排进行供电（见图1）。交流电通过机柜内的电源单元(PSU)转换为48V直流电源(V_{DC})。48V汇流排为以下设备供电：IT设备（包括服务器PSU、GPU节点、交换机）、自带双向直流-直流转换器的电池备份单元(BBU)，以及用于快速暂态支撑与瞬态处理的超级电容单元(SCU)。

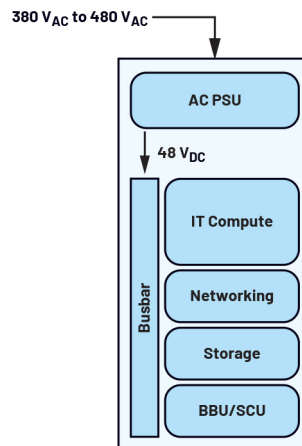


图1. 数据中心48V机柜供电架构。

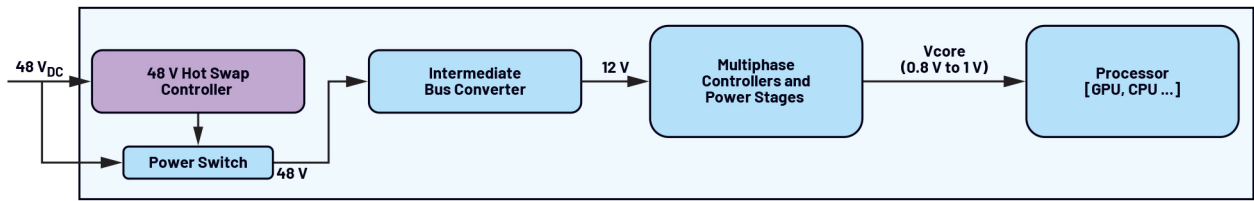


图2. 48V AI服务器。

机柜上的每个节点（例如服务器托盘）都需要具备在设备运行状态下实现接入与断开的功能。试想这样一个场景：一名技术人员到现场更换服务器。为了更换单台服务器而关闭整个机柜是不可行的。这种操作会对数据中心的运行造成极大干扰，更不用说服务器停机带来的巨额损失了。只有在出现重大电力问题（如汇流排或设施供电相关故障）时，才会将机柜下线。除此之外，节点均采用热插拔方式：技术人员无需关闭其他任何设备，即可取下待更换节点、完成替换并重新装回。

在此过程中，节点的热插拔控制器会在内部切断电源，确保节点可安全移除；而机柜的汇流排仍保持通电状态，继续为其他所有节点、BBU及SCU供电。当替换节点安装到位后，预充电电路会在完全接通前限制浪涌电流，这也是热插拔控制器的一项关键功能。随后，替换节点会自动启动并重新接入AI集群（通常由编排工具负责负载再平衡）。

图2展示了AI服务器从48V汇流排处理器的供电分配情况，其中清晰地将热插拔控制器标注为“首个接口”，让技术人员能够安全、高效地移除节点。

ADI公司拥有丰富的48V热插拔控制器产品系列，具备PMBus®电源监控功能，例如LTC4286与LTC4287二者均为7 mm × 7 mm QFN封装的热插拔控制器，分别采用单栅极与双栅极架构。最近，该产品系列又新增了LTC4284双栅极解决方案，其封装规格为5 mm × 8 mm QFN。

向更高电压演进

随着AI处理器的功耗不断增加，机柜级高压直流配电正成为新的发展方向。ADI公司站在技术前沿，并与行业领先企业紧密合作，共同解决相关难题。

机柜侧已定义新的配电电压等级（±400V或800V），由供电侧柜直接输送至IT机柜。图3展示了这一拟议架构。

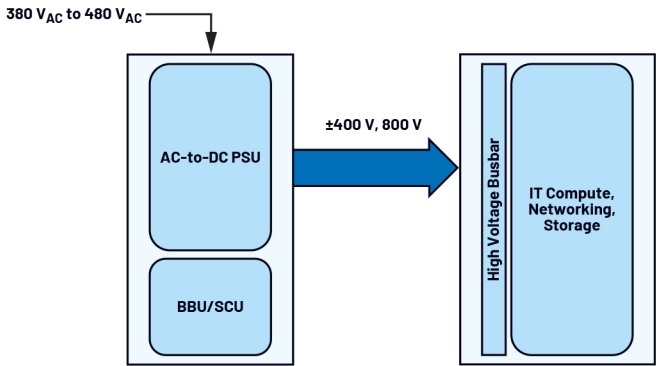


图3. 数据中心±400V/800V机柜供电架构。

机柜级电压向更高水平转型的主要驱动力，是单机柜不断攀升的供电需求。随着供电功率增加，流经汇流排的电流也会相应增大。为维持符合要求的热性能与电性能，电流增大意味着需要更大、更重的汇流排，而这在机械实用性与系统设计层面带来了巨大挑战。通过提高供电电压，所需电流可按比例降低，从而能够使用尺寸更紧凑、更易管理的汇流排及互联元件。这种向更高电压的转型，对于在下一代AI服务器机柜中实现可扩展、高效且机械可行的配电至关重要。

值得注意的是，这种架构演进过程中可能存在过渡阶段：机柜内仍使用48V汇流排。在此情况下，PSU会升级至更高功率规格，在机柜侧接收±400V/800V电压，然后降压转换为48V，以适配现有的48V汇流排。但这并非长期方案，因为其供电能力存在局限（单机柜功率可能最高仅达250kW）；而行业目标是实现单机柜算力最大化，到本十年末将单机柜供电功率提升至1MW。因此，PSU与BBU最适合部署在IT计算机柜外部，如图3所示。

未来，固态变压器有望投入使用，可直接向每个IT计算机柜分配高压，无需再依赖这些供电侧柜。

热插拔技术迈向新高度

ADI公司在数据中心电源领域拥有深厚的专业技术积淀，正与云服务提供商及半导体制造商合作，共同开发下一代机柜级高压供电解决方案。

要实现高压热插拔，需明确诸多设计考量，也需攻克各类技术难题，方能打造出最优解决方案。

- **功率密度：**功率密度是关键因素：因为 $\pm 400\text{V}/800\text{V}$ 热插拔电路最终需集成在IT机柜内的服务器卡上。这些服务器卡的空间极为宝贵，且随着机柜密度提升（即在单个机柜内集成更多服务器），空间限制将愈发严格。因此，高压热插拔解决方案必须设计为占用尽可能小的空间。
- **高压控制与保护：**向 $\pm 400\text{V}$ 及 800V 电压转型，带来了严峻的安全挑战。 48V 电压的触电风险极低，而高电压则可能危及生命。因此，热插拔电路必须在微秒级时间内处理大幅电流浪涌，精准控制变得至关重要。管控浪涌电流上升斜率是核心，这能避免机柜设备损坏，同时保障技术人员安全。此外，系统还需协调时序、检测过流或欠压事件，并在必要时实现平稳关机。
- **遥测：**作为节点供电路径中的首个元件，热插拔控制器是数据采集的理想位置。它必须精准测量电压、电流与功率，以满足系统规格要求，同时还需记录过流、欠压、热关断等事

件日志。此外，热插拔控制器还应上报功率开关(MOSFET)或附近印刷电路板(PCB)区域的温度数据。精准的热插拔遥测技术能为系统带来显著价值：通过实时分析负载电流，改善能源需求预测。热插拔环节收集的历史电流数据，既支持预测性维护（例如在PSU触发故障前识别异常），也能为机柜级配电容量规划模型提供数据支撑。ADI公司正积极开发新型高压热插拔控制器解决方案，以支持新兴的机柜级供电架构。依托在电源保护与遥测领域经过验证的知识产权，ADI正将自身的技术能力拓展至 $\pm 400\text{V}$ 与 800V 领域。通过与领先的数据中心OEM及功率开关供应商合作，ADI公司的下一代解决方案在设计上充分满足热插拔系统不断演进的需求，包括紧凑的外形尺寸、精准的大功率控制及更高的数采精度。这些创新对于保障高压AI服务器环境安全高效运行至关重要。

结语

本文重点阐述了AI服务器机柜向 800V 供电架构转型的关键趋势，这一转型旨在满足先进GPU日益增长的功耗需求，并支持更高的计算密度。新架构将供电元件迁移至独立的供电侧柜，从而优化主机柜内计算资源的空间配置。ADI处于这一技术发展的前沿，所开发的下一代高压热插拔控制器能够有效管理浪涌电流、提供全面的系统诊断与安全遥测功能，并确保运行可靠性。从系统层面审视机柜供电的演进后，开发者可助力云服务器提供商与系统集成商获得新的洞察，实现成本节约。

作者简介

Donal McCarthy是ADI数据中心电源领域的营销总监。他拥有科克大学的工商管理学士学位、波士顿学院的工商管理硕士学位和都柏林爱尔兰管理学院的市场营销文凭。Donal担任过多个职位，包括M/A COM设计工程师、Hittite现场销售工程师和营销职位以及ADI公司营销经理和总监职位。

技术文章

助力未来创新： 适用于1/4砖电源的混合转换器—— 第1部分：优势

Karl Audison Cabas, 应用工程师

Christian Cruz, 资深应用工程师

摘要

将54 V电压转换为合适的12 V电压是一项颇具挑战性的任务，需要新型转换器拓扑来开发改良的高性能电源。此外，为了适应最新的数据中心和超大规模架构，尺寸必须很小，因此1/4砖的小尺寸规格是理想选择。本文将探讨ADI公司的参考设计如何解决效率、功率损耗、散热、通用封装设计等关键问题，从而在同类产品中脱颖而出。另外，还会讨论这些优势对系统应用的积极影响。

简介

在数字信息盛行、社交互动频繁的当今时代，设计精良且运作高效的数据中心显得尤为重要。我们所依赖的网络、存储和全球互联服务都由数据中心来提供。让数据中心保持平稳运行，对于避免数据中断和损坏至关重要。然而，市场对算力的需求不断攀升，数据中心的使用量每年都在快速增长，老旧的数据中心已经不堪重负，快要接近运营负荷的极限。例如，在人工智能(AI)领域，大语言模型的周活跃用户数在不到一年的时间里就翻了一番。相应地，市场对更高功率密度的需求也日益增长，进而需要更稳健和高性能的电源转换器。

为了支持更加强大的服务器、网络设备和存储系统，数据中心不断扩展，电力需求持续上升，从输电线路到机架内部的可用直流电压，涉及多级电源转换。在数据中心内，传统架构通常将整流后的交流电压转换为12 V DC，作为主板内部的主要电源。然而，12 V DC架构效率低下的问题日益凸显，无法满足电路板内的主电源供电需求。若将输入电压提高到48 V，则PCB两端的 I^2R 损耗最多可降为原来的1/16，转换损耗将大幅降低，而且48 V电压仍属于安全特低电压(SELV)。

因此，中间总线转换器是现代数据中心电源架构中的关键器件，它将主电源（如UPS不间断电源）提供的48 V电压总线转换为现有的中间总线电压（5 V、12 V架构）和负载点(POL)稳压器的输入电压。这种电源被称为中间总线转换器(IBC)。IBC有多种功率容量和尺寸，其中一种常见的类型是1/4砖(QB)电源。

1/4砖电源(QB PS)是一种紧凑、高效的DC-DC转换器模块，在现代电源系统中扮演着至关重要的角色。它将高压直流输入转换为相对较低的电压，从而为主板内部的各种外设和核心处理器供电。“1/4砖”是指这种电源的形状小巧，且呈矩形。此类电源通常占用大约58.4 mm × 36.8 mm (2.3英寸×1.45英寸)的PCB面积，高度通常约为14.5 mm (0.57英寸)。QB PS虽然尺寸小巧，但效率很高，并且可以轻松集成到现有电源系统中。

此类电源广泛应用于数据中心，因其尺寸小和效率高的特点，成为服务器机架、网络交换机、通风系统、整流器和备用电池的理想选择。凭借多功能性和出色的可靠性，QB电源是满足现代电子基础架构电源需求的理想解决方案。QB电源的输入电压范围通常为40 V至60 V，也有一些型号支持其他的输入电压范围。此类电源利用开关技术，高效地将输入电压调节和转换为较低的稳定输出电压，通常为9 V至16 V。输出电压可以根据具体需求而变化。

1/4砖电源的主要特性通常包括：

高效率

此类电源能够使转换效率最大化。转换损耗应低于传统12 V DC架构的 I^2R 损耗。

宽输入电压范围

此类电源可以接受宽范围的输入电压，因而与各种电源兼容。典型的标称输入电压范围在48 VDC至54 VDC之间，扩展范围为40 V DC到60 V DC。

保护机制

此类电源具有过压保护、过流保护、短路保护和热关断等保护特性，可以保护电源和相连设备。

散热管理

高效散热是保障可靠运行的关键。QB电源通常内置散热管理功能，比如利用散热器或集成风扇来调节温度。

远程检测

某些型号支持远程检测，可补偿输出线缆造成的电压降，确保负载获得精确稳定的电压。

PMBus®和高级控制功能

许多QB电源提供高级控制功能，例如电压微调、远程开/关控制、与其他电源模块进行同步等。

可扩展性

QB电源应当易于扩展，即只需对电路进行少量改动就能实现扩展。而且，QB电源可以配置为并联操作以满足不同的功率需求，并且可以处理预偏置启动，以实现热插拔功能。

选择QB电源时，必须考虑多种因素，例如输入/输出电压要求、负载电流、效率、工作温度范围、适用于目标应用的特定行业认证或标准等。而QB参考设计具备了所有这些特性，适合需要稳定高效供电的高要求应用。

QB电源的关键组成部分包括输入滤波器、输出滤波器、一些反馈控制电路以及保护机制，其中保护机制可以包含在控制器或电源管理IC(PMIC)中。参见图1。

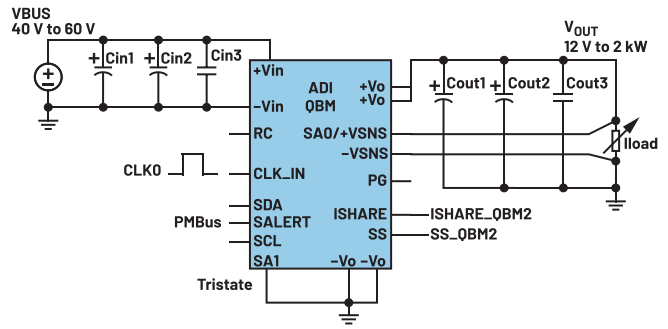


图1. AD11/4砖PSU框图。

QB电源的优势

小尺寸

QB电源的主要优势之一是其外形紧凑，因而在尺寸受限的应用中，它能使空间得到有效利用。

高功率密度

QB电源尽管体积很小，但具有高功率密度，能够提供相当大的功率输出。

效率

随着电源转换技术的进步，QB电源实现了高效率水平，减少了能量浪费，并尽可能降低了发热量。

散热管理

QB电源通常注重散热管理设计，例如采用可加装散热器的扁平基板，以确保在具有挑战性的热环境中实现理想的运行性能和可靠性。

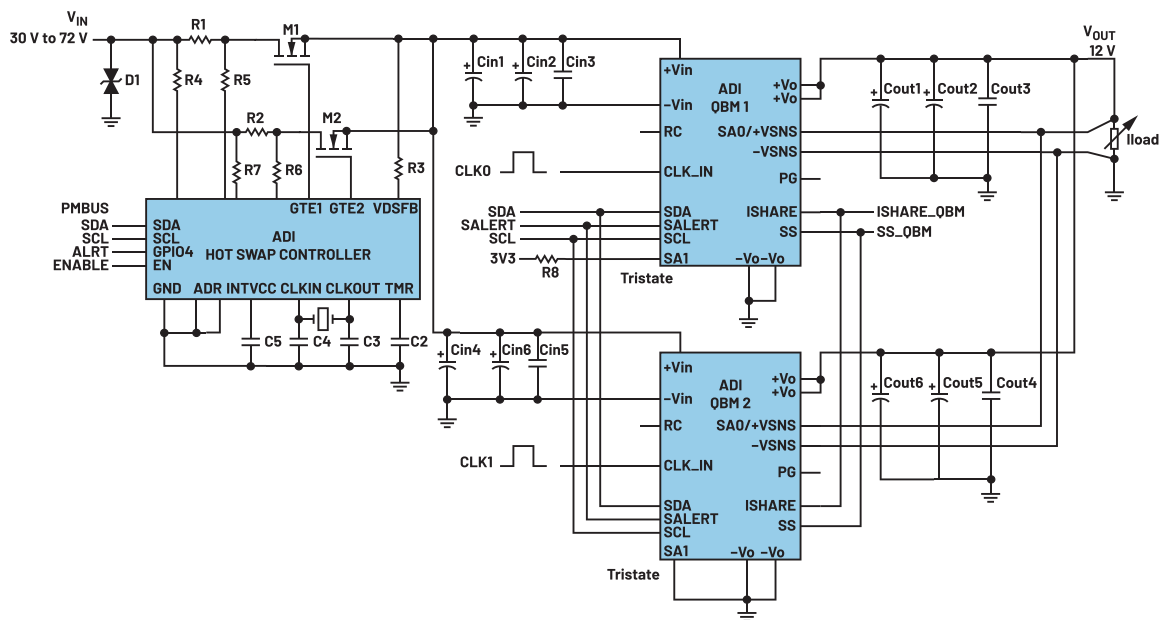


图2. 将SS和ISHARE引脚相连, LTC7822 QB电源便可实现并联。

可靠性和耐用性

此类电源的设计符合严格的行业标准，即使在恶劣的工作条件下也能确保长久的可靠性和耐用性。

供应链韧性

不同厂商的QB电源引脚采用通用封装(CFP), 因而相互兼容, 由此确保了生产供应链的韧性, 出现故障时也便于提供售后支持。

基于LTC7822的QB电源的主要特性

宽输入电压范围

QBM电源通常支持宽输入电压范围，能够与各种电源兼容。

输出电压调节

此类电源提供精确稳定的输出电压调节能力，确保在不同负载条件下保持性能一致。

高功率密度

此类电源的拓扑通过增加一个开关电容部分将输入电压减半,从本质上缩小了电感的尺寸。

可扩展

此类电源的拓扑是一种电流模式电源，将软启动引脚和补偿引脚相连，即可轻松实现并联。这种拓扑降低了并联操作的复杂性。图2显示了各个0B并联的示例。

保护机制

QBM电源集成了过压保护(OVP)、过流保护(OCP)、短路保护(SCP)和热关断等保护特性,能够防范电气故障并防止相连设备受损。

可靠性

由于存在电容分压结构，这种拓扑自身就能够保护任何下一级下游转换器免受直流高电压的影响。即使最顶部的FET失效，也会形成分压结构，以防止下游转换器发生故障。

采用QB拓扑的混合转换器

QB电源是一种DC-DC转换器, 可将40 V至60 V的输入电压转换为12 V的稳定输出电压。这种设计利用了一种复杂的架构, 结合了软开关电荷泵分压器和同步降压(buck)转换器拓扑。软开关电荷泵会以非常低的转换损耗将输入电压减半, 因此降压部分仅需在 $V_{IN}/2$ 电平(即MID引脚电压)下进行硬开关操作(图3)。通过这种方式, 可以实现高效的电源转换, 并缩小输出端电感。此方案的代价是须将一个电容用作另一个储能元件, 但通过优化额定值和尺寸, 混合转换器性能可以超越市面上的大多数常规拓扑。本文将讨论混合转换器作为一种高效拓扑的原因及其工作原理。

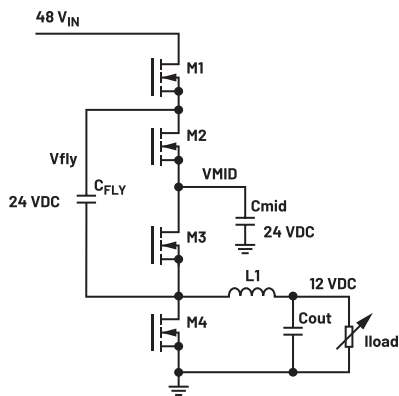


图3. 飞跨电容和中间电容两端的电压。

对于1/4砖应用，混合转换器在功率传输和功率密度之间取得了良好的平衡。典型的固定比率开关电容在高功率密度和低输出功率水平下非常高效。例如，LTC7820在28 mm × 28 mm PCB面积上进行48 V至24 V转换时，效率高达99%（图4）。然而，这种设计只能支持大约300 W到600 W的输出功率。

要在不降低效率的情况下实现更高的输出功率，需要考虑再并联一个开关电容转换器和更多的陶瓷电容，因而需要更大的PCB面积。这会极大地影响功率密度，并且24 V至12 V DC转换需要第二级电路。为此，我们可以采用另一种开关电容拓扑，利用Dickson转换器来实现单级4:1降压比。此拓扑需要用到额外的开关，但也存在同样的问题，即超过600 W时需要更多陶瓷电容，当应用需要更大输出电流时会影响可扩展性。

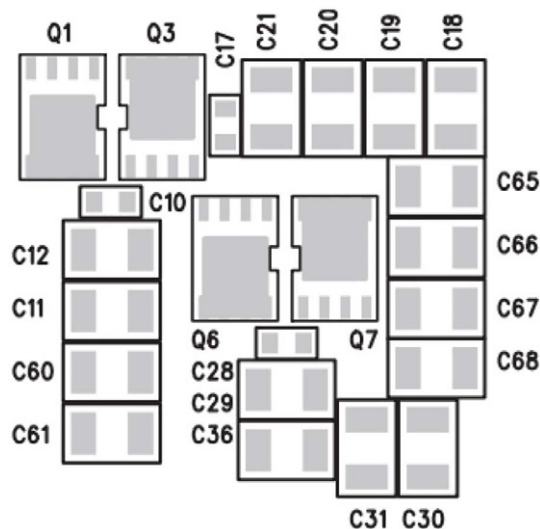


图4. 采用LTC7820的48 V_{IN}至24 V_{OUT}、20 A开关电容转换器。

稳压混合转换器是更适合1 kW功率级别的拓扑，因为它能在有限的PCB面积下提供更高输出电流。开关电容部分将转换主输入电压线，而不处理大部分电流转换。主输出电流转换由降压部分承担，飞跨电容尺寸和电感尺寸得以减小。对于1/4砖外形，固定尺寸为58.4 mm × 36.8 mm，因而PCB面积至关重要。图5显示了1/4砖尺寸的四相混合转换器的参考元件布置。

LTC7822是一款高性能、两相混合式降压DC-DC控制器，专为高密度电源应用而设计。它所采用的拓扑如图6所示，包含两相，但大大减少了每瓦所需的电容元件数，因为一相的飞跨电容身兼两职：(1) 用作其互补相的电容分压器，(2) 用作其自身相的主储能元件之一。如此一来，每相所需的中间电容数量大大减少。这款器件的单芯片功率输出可达1 kW，大于相同面积下任何典型开关电容拓扑的输出功率。

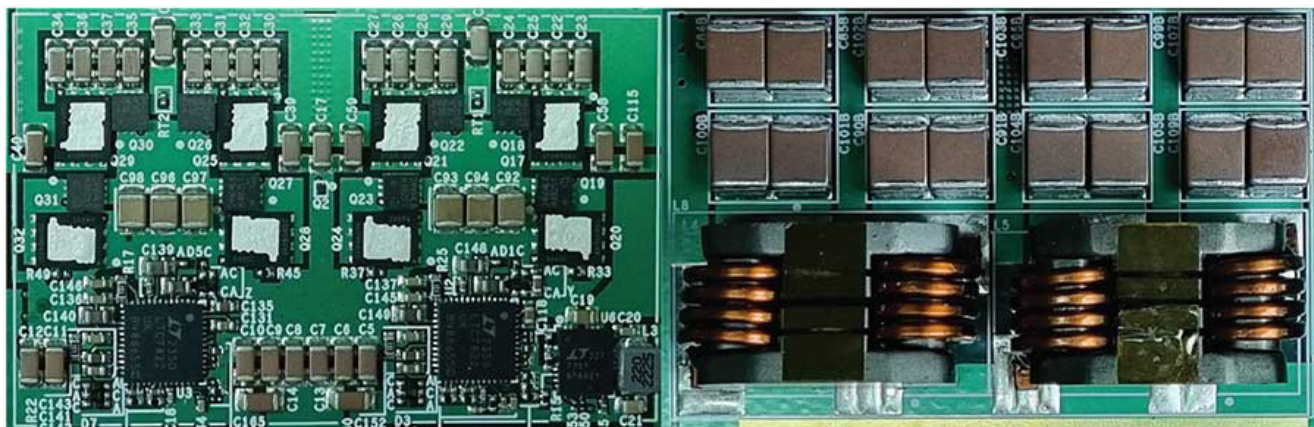


图5. 四相2 kW混合转换器，采用LTC7822以适应1/4砖PCB面积。

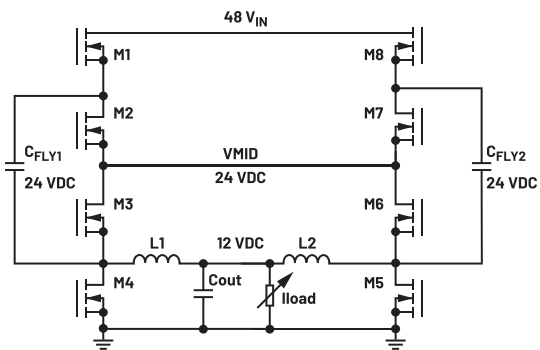


图6. C_{FLY1} 和 C_{FLY2} 充当电容分压器。

当奇数FET (M1、M3、M5、M7) 导通时，互补FET (M2、M4、M6、M8) 关断。在开关切换过程中， C_{FLY1} 由输入电压供电，并通过VMID节点与 C_{FLY2} 串联。这两个飞跨电容应具有相同的容值，以确保平均电压相等，从而降低电荷再分配时电流尖峰造成的损耗。

谨慎选择MOSFET也很重要，务必确保底部FET (M4、M8) 在安全工作区域(SoA)内工作。由于两个网状电流通过公共MID节点共享，底部FET所承受的最大电流约为平均相电流的1.5倍。举个例子：L2断电时，电流将流过M5。但是， C_{FLY2} 也通过M3向L1提供部分能量，因此其返回路径也将经过M5。电流流向参见图7。

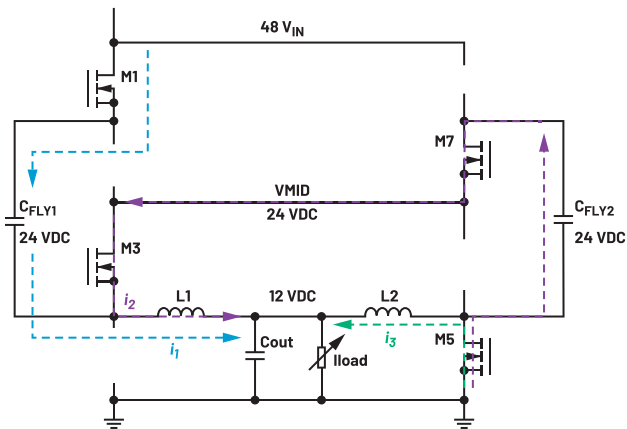


图7. $i_1 + i_2 = i_o$, $i_1 = i_2$ 。M5接收的电流是其相电流的1.5倍。

中间总线转换器中的耦合电感

耦合电感具有整数比转换特性，因此是中间总线应用中与混合转换器配合使用的另一种优秀技术。对于两相耦合电感设计，48 V至12 V转换的占空比为50%，使得降压部分工作在陷波频率下。即使对于更宽的40V至60V（典型）输入电压范围，用耦合电感代替分立电感(DL)仍能获益。图8显示了不同相数的分立电感和耦合电感的归一化电流纹波比较。

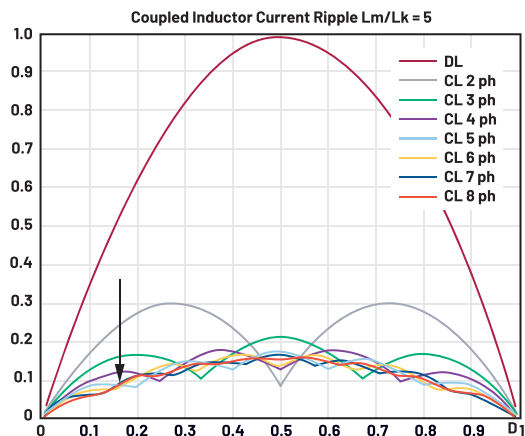


图8. 对于给定的耦合系数 Lm/Lk ，归一化电流纹波与占空比的关系。

如图8所示，对于两相耦合电感设计，电流纹波在50%占空比时最小。请注意，在不同占空比下，耦合电感的优势并不相同。相数不同，电流纹波降幅最大化的陷波位置也不同。因此，对于1/4砖设计，考虑输入电压范围和目标输出电压非常重要。例如，降压比为4:1的混合转换器应使用两相设计，以使耦合电感的电流纹波降幅最大化，但降压比为8:1时，由于25%占空比下的陷波，设计人员可能需要考虑使用单个四相耦合电感设计。图9为单个四相耦合电感的示例。



图9. 单通道四相耦合电感，与四相混合转换器配合使用时，可实现48 V至6 V转换。

在1/4砖设计中使用耦合电感，最重要的影响在于，能在保持效率的同时，使磁元件的尺寸显著减小。如此一来，混合转换器不仅能够适应1/4砖面积，而且仍能以具有竞争力的效率提供非常高的输出功率。

1/4砖电源应用

QB电源在各行各业都有应用，包括以下领域。

它常用于电信基础设施、数据中心和网络设备，为通信系统和网络交换机供电。

QB电源适用于工业自动化应用，如电机驱动器、机器人和控制系统。

使用基于混合转换器的1/4砖电源，可以实现不同的输出电压降压比。借助ADI公司的分立1/4砖参考设计，可以更轻松地使用多个耦合电感来评估最多两种输出电压电平，或将它们并联起来以测试是否满足更高输出电流要求。图10显示了1/4砖部分。

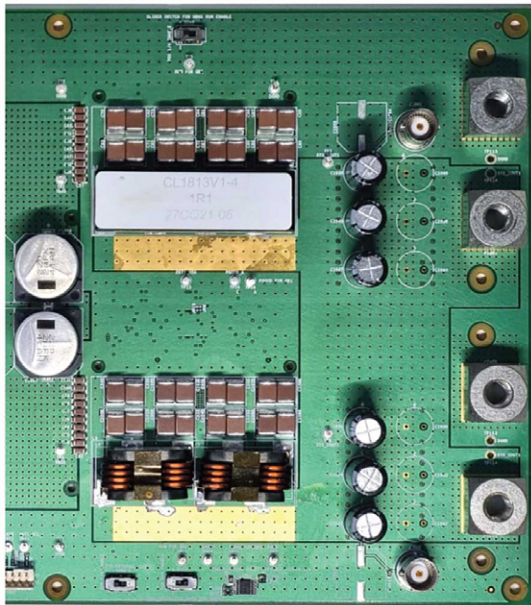


图10. ADI分立1/4砖参考设计。

结语

面对日益增长的算力需求，尤其是随着人工智能的快速增长，传统数据中心已难以满足需求。为了应对此类挑战，现代数据中心开始采用功率密度更高的新设计，例如48 V架构。与传统的12 V架构相比，新架构的功率损耗显著降低。在这一转变中，起关键作用的器件是中间总线转换器，具体而言就是1/4砖电源。为将高压直流输入转换为各种外设和核心处理器所需的较低电压，此类紧凑、高效的DC-DC转换器必不可少。

QB电源是精简的高性能电源解决方案，适合多种应用。此类电源以紧凑的设计、高能效和出色的可靠性而闻名，拥有优越的功率密度、精准的电压调节能力和先进的保护特性，是众多行业不可或缺的重要器件。QB电源能够尽可能提高空间利用率，确保可靠运行，并满足现代电子基础架构的供电需求。

作者简介

Karl Audison Cabas自2020年9月起担任ADI公司的应用工程师，专注于电源应用方面的工作。他拥有菲律宾理工大学电子工程学士学位和玛布亚大学电力电子硕士学位。他在DC-DC电源转换器方面拥有4年多的经验。他之前的职责是处理客户问询以及与DC-DC转换器相关的设计问题。他目前担任云和数据中心应用的电源系统应用工程师。

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的资深应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

ADI公司的混合转换器及最新的LTC7822，在为数据中心供电方面具有显著优势，不仅效率高、性能稳健，而且具备先进的控制特性。凭借优化的紧凑外形，并结合耦合电感，LTC7822成为高功率应用领域中颇具竞争力的拓扑方案。增强的可靠性和更低的运行成本，使之成为数据中心实现高效、可靠电源管理的理想之选。

本系列的下一部分将介绍基于LTC7822的1/4砖电源的全面评估，展示收集到的电气和散热性能数据，并讨论如何为高功率应用选择合适的元器件。

参考文献

Sam Ben-Yaakov、Michael Evzelman，[“Generic and Unified Model of Switched Capacitor Converters”](#)，2009年IEEE能源转换大会暨展览会，2009年9月。

Cruz Christian，[“48 V技术的魅力：系统级应用中的重要性、优势与关键要素”](#)，《模拟对话》，2024年7月。

Michael Evzelman、Shmuel Ben-Yaakov，[“Average-Current-Based Conduction Losses Model of Switched Capacitor Converters”](#)，《IEEE电源电子会刊》，第28卷第7期，2012年10月。

Bruce Haug，[“72 V混合式DC-DC转换器使中间总线转换器的尺寸减小达50%”](#)，《模拟对话》，2018年2月。

Alexandr Ikriannikov，[“耦合电感器技术的优势”](#)，Maxim Integrated，2015年3月。

Alexandr Ikriannikov、Laszlo Lapcsei，[“大幅提高48 V至12 V调节第一级的效率”](#)，ADI公司，2023年12月。

[“OpenAI says ChatGPT's Weekly Users Have Grown to 200 Million”](#)，路透社，2024年8月。

Samuel Webb、Yan-Fei Liu，[“A Novel Intermediate Bus Converter Topology for Cutting Edge Data Center Applications”](#)，《中国电气工程学报》，第6卷第4期，2020年12月。

技术文章

助力未来创新： 适用于1/4砖电源的混合转换器—— 第2部分：性能

Karl Audison Cabas, 产品应用开发工程师

Ralph Clarenz Matociños, 应用开发助理工程师

Christian Cruz, 资深应用工程师

摘要

随着48 V架构的出现, 1/4砖电源成为数据中心应用中的一个关键组成部分。电源必须在效率和瞬态响应方面表现出色, 同时仍保持1/4砖的尺寸规格。在严格的尺寸限制下, 基于混合转换器的1/4砖电源能够同时满足高效率和瞬态响应的要求, 并提供高达2 kW的输出功率。4相混合转换器集成了一个双2相耦合电感, 在降压部分使用2:1的降压比, 从而显著降低了电流纹波, 进一步提升了性能。参考设计在48 V输入下的峰值效率为98.59%, 在54 V输入下的满载效率为97.68%。

引言

随着处理器核心的性能提升, 加上数据中心越来越多地使用人工智能(AI)芯片, 下一代计算机对电力的需求远超以往, 而且需要保持外形尺寸不变, 以确保迁移工作的前期成本最小化。为此, 亟需性能更好但尺寸不变的电源来为下一代芯片提供所需的电力。因此, 使用标准化的1/4砖电源对系统设计十分有利。1/4砖电源具有开箱即用的特性, 并且不同供应商的产品能够相互兼容, 因此使用这种电源可以降低系统设计的复杂性。

然而, 并非所有1/4砖电源的拓扑和性能都相同, 因此工程师应根据具体要求谨慎选择。采用1/4砖电源进行设计时, 工程师需要考虑的一些关键参数包括: 工作输入电压、输出电压调节、峰值效率、满载效率、瞬态性能、热性能、可扩展性等。

本文将介绍采用4相混合转换器LTC7822设计的分立式1/4砖电源及其性能, 并探讨如何以高效率满足更高的输出功率需求。

数据与结果

以下测试结果包括启动时的测量数据、稳态性能测量数据、工作性能波形和温度测量数据。下列配置采用1/4砖参考设计及其系统板进行了测试。系统板配有热插拔电路。

1/4砖电源的工作设置

- 输入电压: 40 V至60 V
- 输出电压: 12 V
- 输出负载: 0 A至166.67 A
- 开关频率: 150 kHz

性能数据

效率与功率损耗

1/4砖参考设计采用双2相混合转换器LTC7822，可以实现负载分配，降低每相电流，从而减少导通损耗，成为高功率、高降压比应用的理想选择。LTC7822混合转换器展现出优异的效率，有效减少了功率损耗，进而降低了散热需求。

在48 V和54 V输入条件下，测试了这种1/4砖电源的效率，效率曲线如图1所示。输入电压较低时，由于电压降幅较低，因此峰值效率更高。然而，当输出功率提高时，由于输入电流增大，效率会逐渐下降。而在54 V下，峰值效率较低，但满载效率更高。

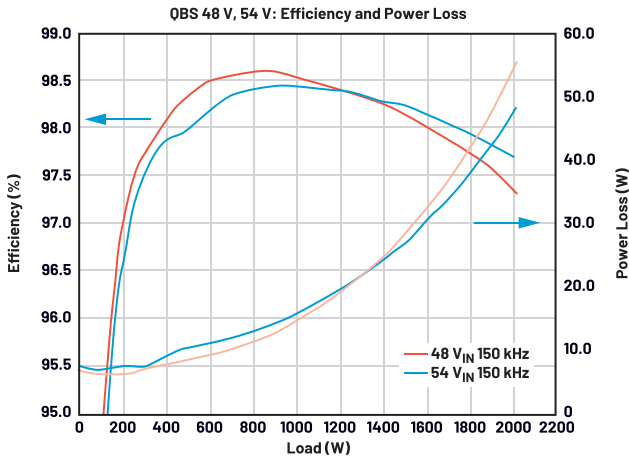


图1. ADI的1/4砖设计在48 V和54 V下的效率及功率损耗曲线

在1/4砖PCB面积上，转换器在48 V、800 W时达到约98.59%的峰值效率，满载效率为97.33%。对于54 V应用，转换器在1000 W时达到98.45%的峰值效率，满载效率为97.68%。

混合转换器采用的同步整流技术减少了二极管导通损耗，进一步优化了效率。控制器通过使用高质量、低等效串联电阻(ESR)的输入和输出电容器，再配合适当选择的耦合电感，有效降低了关键元件的损耗。精心挑选的元件和周全的设计考量，使整体功率损耗得以降低，混合转换器因此成为降压型应用的高效解决方案。

此外，混合转换器的开关频率可以灵活调整，设计人员可以根据具体应用要求，在效率和开关损耗之间找到平衡点。再结合适当的布局设计、有效的热管理和控制环路参数的优化，就能打造出可靠高效的电源。总之，LTC7822凭借双相架构、同步整

流和灵活性脱颖而出，在众多降压转换器应用中都能展现出优异的效率和更低的功率损耗。

瞬态响应：扩展供电功率

LTC7822混合转换器非常适合用来满足中间总线应用的动态供电需求。创新的4相架构能够有效分配负载，降低负载意外变化的影响。从而提升了控制器的能力，能够快速有效地适应功率需求变化，确保在瞬态事件期间输出电压保持恒定。双2相的交错操作支持对突发负载波动做出快速响应，在需要快速调整电源的情况下至关重要。

LTC7822能够在有限的时间内提供扩展功率，以支持突发负载需求，同时输出电压保持稳定。我们对这个额定功率2 kW的设计进行了测试。图2所示为以1.5倍扩展功率供电50 ms的情形，图3所示为以1.8倍扩展功率供电500 μ s的情形。

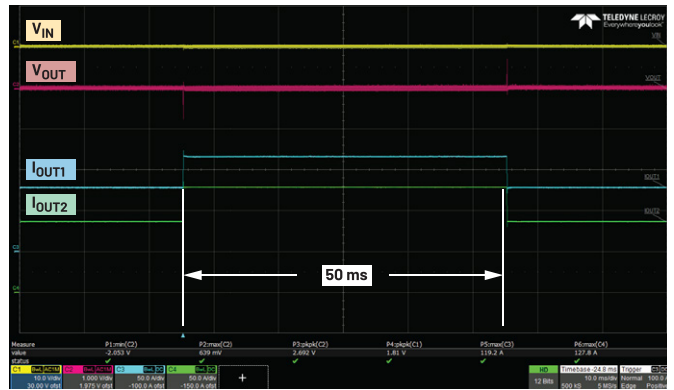


图2. 2 kW扩展到3 kW阶跃负载，持续50 ms

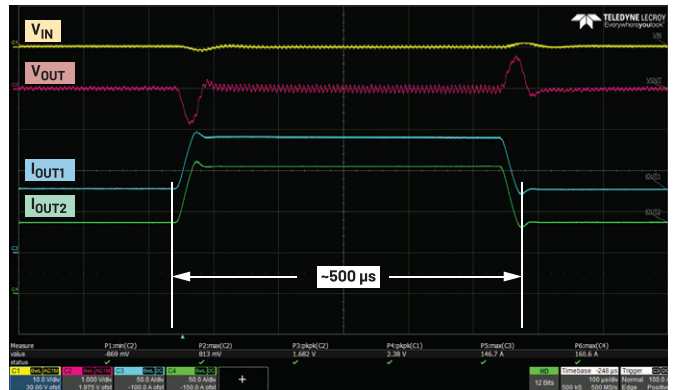


图3. 2 kW扩展到3.6 kW阶跃负载，持续500 μ s

通过调整2型补偿，可以进一步优化混合转换器的瞬态响应，实现精密调节和输出电压偏差的最小化。

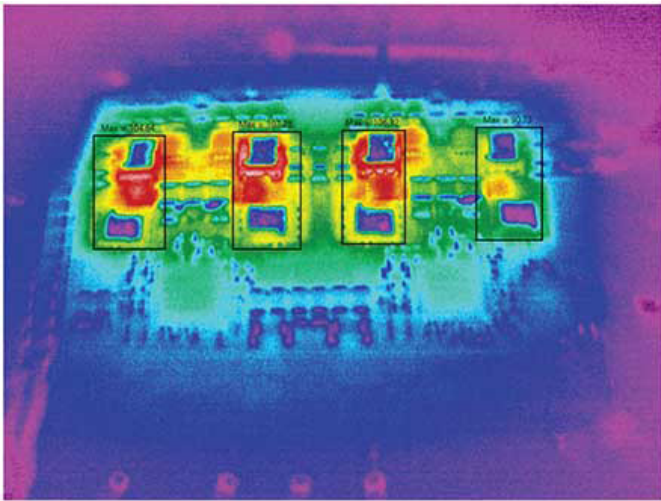


图4. 48 V_{in}、满载($P_{out} = 2\text{ kW}$)下的1/4砖电源热性能

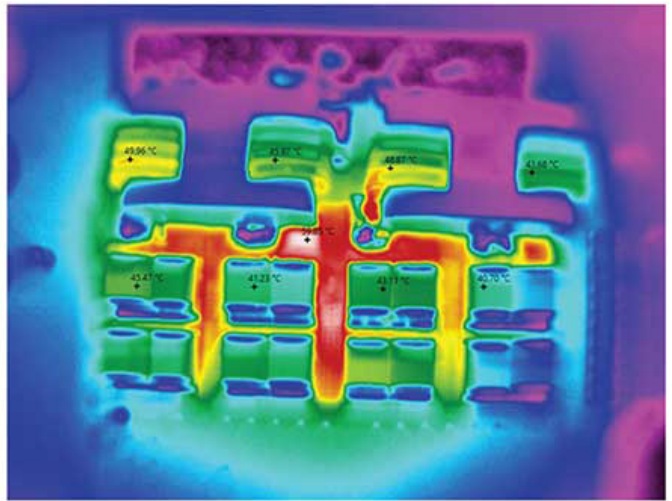
热性能

这种参考设计的热性能对于整体性能的发挥至关重要。适当的热管理能够确保器件可靠运行，防止过热，从而避免性能降低和电子元件寿命缩短。图4所示为在没有使用散热器和底板的情况下的热特性。

为了增强混合转换器的热性能，可以采用高效的散热器，确保热量有效散发，同时保证器件周围空气流通顺畅。数据手册通常会提供有关如何适当设计散热器的建议，包括热阻和最大允许结温等详细信息。设计人员可以遵循这些指导原则，防止关键器件（控制器、FET）的温度超过限值，确保系统可靠持续地运行。此外，混合转换器可能具有过温保护等特性，以保护器件免受过热问题的影响。这种保护机制可以在温度过高的情况下自动关闭控制器或降低输出功率，防止器件和周围元件受损。

启动响应

混合控制器具备可控的启动响应，保证运行的可靠性和稳定性。它采用两段式软启动：飞跨电容预充电阶段和输出软启动阶段。这样可以利用主电源的低输入冲击电流为飞跨电容充电，而输出电压也会在初始上电期间逐渐上升。这种设计避免了飞跨电容的冲击电流和电压过冲，增强了系统的可靠性，并



保护下游元件免受损坏。控制器还具备故障监测机制，能够检测启动期间的异常情况，触发适当的响应来避免潜在问题。图5显示了在开启降压部分之前如何对飞跨电容进行预充电。

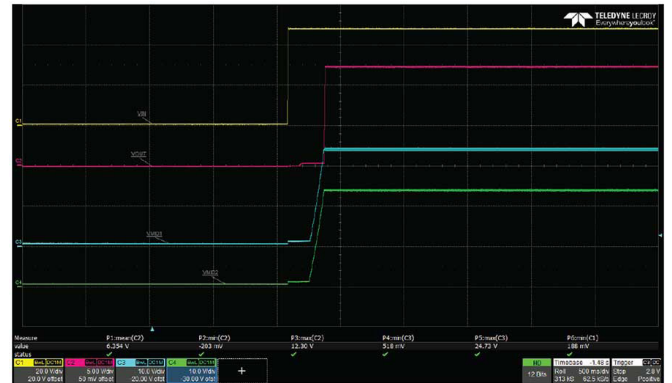


图5. 混合转换器在空载条件下启动

在启动过程中，混合转换器谨慎地逐步提高输出电压，确保平稳过渡到工作模式。对于电压的骤变可能会对所连接元件造成影响的应用而言，这种受控启动方式至关重要。控制器能够处理各种情况下的启动过程，支持广泛的输入电压和负载场景。ADI公司的1/4砖参考设计还集成了热插拔控制器LTC4287，以确保输入电压平稳升降。

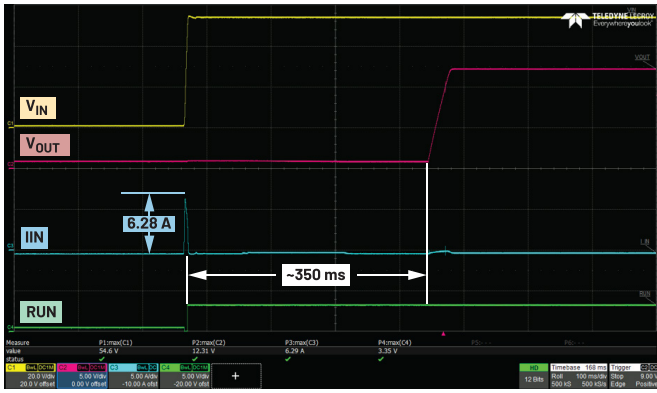


图6. 1/4砖电源在空载条件下启动

输出纹波

输出纹波是指电源输出电压的波动或变化。为了实现低输出纹波，控制器采用了交错双相架构，并结合了耦合电感，开关相位之间略微错相，从而有效降低了输出电压纹波，使得输出电压更干净、更稳定。参见图7。

混合转换器的输出纹波性能受多种因素影响，包括输入和输出电容器的质量、电感的选择及整体的布局设计。通过采用高质量、低ESR的电容器并选择适当的电感，设计人员可以进一步降低输出纹波。数据手册通常会提供有关如何选择合适的电容器以优化输出纹波性能的指南和建议。在要求保证低输出电压纹波的应用中，多相设计和特性有助于维持平稳且精准调节的输出，对于需要稳定电压以确保正常运行的敏感电子元件或系统尤其有利。

参考文献

Christian Cruz, “48 V技术的魅力：系统级应用中的重要性、优势与关键要素”，模拟对话，第58卷，2024年7月。

Bruce Haug, “72 V混合式DC-DC转换器使中间总线转换器的尺寸减小达50%”，《模拟对话》，第52卷，2018年2月。

作者简介

Karl Audison Cabas自2020年9月起担任ADI公司的应用工程师，专注于电源应用方面的工作。他拥有菲律宾理工大学电子工程学士学位和玛布亚大学电力电子硕士学位。他在DC-DC电源转换器方面拥有4年多的经验。他之前的职责是处理客户问询以及与DC-DC转换器相关的设计问题。他目前担任云和数据中心应用的电源系统应用工程师。

Ralph Clarenz Matociños毕业于菲律宾马尼拉Pamantasan ng Lungsod ng Maynila (PLM)，获电子工程学士学位。他在电力电子领域拥有一年多的工程经验，包括电池管理系统开发和DC-DC电源转换。他于2022年加入ADI，目前担任云和数据中心应用的电源系统应用工程师。

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的资深应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

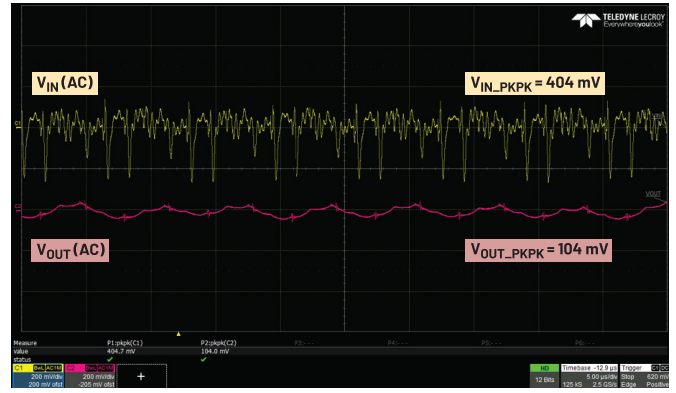


图7. 输入电压纹波和输出电压纹波

输入和输出电压的纹波数据也依赖于测量设置，建议在最近的陶瓷电容器处使用短探头来采集稳态下的真实纹波性能。

结论

1/4砖电源是精简的高性能电源解决方案，适合多种应用。此类电源以紧凑的设计、高能效和出色的可靠性而闻名，拥有优越的功率密度、精准的电压调节能力和先进的保护特性，是众多行业不可或缺的重要器件。

ADI公司最新的混合转换器LTC7822在为数据中心供电方面具有显著优势，不仅效率高、性能稳健，而且具备先进的控制特性。它能够优化供电、增强可靠性并降低运行成本，因而成为数据中心实现高效、可靠电源管理的理想之选。

Alexandr Ikiriannikov、Laszlo Lipcsei, “大幅提高48 V至12 V调节第一级的效率”，ADI公司，2023年10月。

“The Benefits of the Coupled Inductor Technology”，Maxim Integrated, 2015年3月。

技术文章

一次通过EMI合规性测试—— 第1部分：相关物理知识

James Niemann, 现场应用工程师

摘要

对于任何需要高速时钟的产品设计，电磁兼容性(EMC)合规问题可能是一大困扰。本文从电磁(EM)场定向的角度概述了印刷电路板(PCB)设计，旨在帮助读者一次性通过电磁干扰(EMI)合规性测试。用于降低EMI的技术也将减轻干扰，这体现了通用的PCB布局理念。本文分为三个部分。文章将首先介绍基本物理知识，帮助读者了解为什么本文所述的技术能够减轻PCB布局上的EMI。第2部分将举例说明如何将第1部分的材料应用于实际电路板布局。最后，第3部分将讨论满足所提议解决方案的复杂电路板的PCB布局策略。

简介

在设计过程中，为什么合规性往往是最后才考虑的因素？这通常是因为在开展任何实际测试之前，需先确保整个系统可用。如果在设计后期才发现问题，那么可能需要调整印刷电路板(PCB)，当产品设计周期的后期涉及到多人操作时，这项工作的成本总是很高。这种情况常令人可惜。但实际上，只需遵循本文中描述的最佳实践，就必然可以符合电磁兼容性(EMC)（辐射、传导或敏感性）要求。本文所述方法有助于将电磁干扰(EMI)合规性贯穿整个PCB的架构、设计和布局过程。本文的目的不仅仅是演示如何设计电路板以使其通过EMC测试，更是希望读者能理解相关基本原则及工作原理，以便读者可以在其他地方运用这些原则。

EMI、干扰和敏感性背后的基本原理非常简单。减少EMI的关键就在于控制和约束电场与磁场。简单来说，如果电磁(EM)场暴露在自由空间中并可以进一步扩展，干扰和EMI就会随之产生。如何实现这种场约束？只需在电路板上（以及任何连接的电缆中）各处设计实现零净加速电荷即可。这意味着对于每个正在加速的电荷，其附近都有另一个电荷可以沿与原始电荷相反的方向加速。当这些事件在远场一起发生时，每个电荷的效应将能够抵消。没有了场能，就不会产生EMI或干扰。也就是说所有电磁

场能量将会被约束在元件内部，或者约束在信号走线与接地层之间的PCB电介质中。上述理念适用于电路板上的走线，但事实上，孤立系统中带有无约束场且长度较长的天线是更大的问题。我们将在日后的文章中讨论这一主题。

电荷上静态和动态力的物理知识

电荷只有暴露在电场中时才会移动。空间中给定位置的电场可以是静态的（例如静止电荷产生的场）。某一位置的电场也会随时间而变化（例如运动电荷产生的场）。当电荷开始运动时，磁场便随之产生。与电场类似，磁场既可以是静态的，也可以随时间变化。根据洛伦兹力公式 $F = q(E + v \times B)$ ，我们可以得知，磁场中的运动电荷会受到一个力，这个力的方向要么朝向产生磁场的运动电荷，要么远离它们。由于只有电场才能对电荷施加力，因此磁场实际上是由相对论效应产生的电场。这是运动电荷原始库仑场的一种表现形式。电场和磁场本质上是同一种物理现象，只是在不同的参考系下呈现出不同的形态。

当这些场随时间而变化时，可能会产生辐射或EMI。电荷可以是静态的，可以在空间中移动，或者被加速。只有当电荷被加速时，才会产生辐射。这本质上是简单的事实：磁场本质上是电场，而加速电荷将导致该相对论场释放其能量。加速电荷同时

满足安培定律和法拉第定律的条件，从而在空间中形成了传播的电磁场。通过仔细研究下方所示的麦克斯韦方程组，我们可以从数学上解释这一现象。其中，安培和法拉第提出的第三和第四个方程是理解辐射和EMI的关键。

电场的高斯定律：

$$\oint_S D \times dn = \oint_S \rho v dv \quad (1)$$

磁场的高斯定律：

$$\oint_S B \times dn = 0 \quad (2)$$

安培-麦克斯韦定律：

$$\int_L H \times dl = \int_S J \times dn + \delta / \delta t \int_S D \times dn \quad (3)$$

法拉第定律：

$$\int_L E \times dl = -\delta / \delta t \int_S B \times dn \quad (4)$$

这些方程表明，除了使用电荷，还有其他方法可以产生电场和磁场。变化场或动态场也可以创建场，进而会在自由空间或PCB上传播电磁场能量。坡印廷能量矢量描述了该能量的运动。

坡印廷矢量：

$$S = E \times H \quad (5)$$

有电压和电流的地方始终存在场。电磁场是信息和能量的载体。消除电磁场既不可行，也不可取。我们的目标是控制场的位置，以使电磁场不能对受扰电荷施加力（即避免干扰），也不会向自由空间辐射（即避免EMI）。

好消息是，如果PCB设计合理，就可以自动约束这些场。

无论是运动电荷还是静止电荷，任何电荷分布都会自行排列，从而尽可能减少因电荷分布而存储或耗散的能量。

这一规律不仅适用于静电能，也适用于磁能。参与分布的电荷首先会自行排列，以尽可能减少存储的能量。随着时间推移，该排列将恢复成耗散尽可能少的能量。这种行为实际上是电荷之间相互作用力的结果。

那么，应如何设计电路板以尽可能减少其存储的能量？这可以通过在信号和电源路径附近设置接地层来实现。接地层的靠近

使得铜几何结构能够存储最少的电能和磁能。这是因为电场将从接地层获取电荷，从而几乎抵消从外部观察到的净电场，正如从该偶极外部所见。同样，当电荷加速时，法拉第定律会在接地层中感应出电流，从而抵消外部磁场。在设计电路板时，应确保这种自然现象能够顺利发生。需要注意的是，这两种效应几乎是即时发生的，唯一的延迟是信号从电荷到接地层的传播速度（即光速C）。

上文还描述了传输线路的属性。大多数工程师对传输线路了如指掌，并且每天都会为高速电路使用传输线路。为了避免干扰和EMI，必须将这些传输线路技术融入所有PCB应用。微带线传输线路可能是PCB设计中较常用的结构，基本上只是接地层上方的一条走线。理论上，这会将电场和磁场约束在走线和接地层之间的空间内。如图1所示，在体积A中，麦克斯韦方程组表明，封闭的总电荷等于穿过该体积表面的电通量的积分。由于零电荷被包围，且内部相等和相反电荷的分离发生在同一个地方，表面外的净电场将趋近于零。传输线路，表面B，将包围零加速电荷。麦克斯韦方程组表明，如果穿过表面B的净电流为零，那么围绕该表面的磁场的线积分也将趋近于零。根据法拉第定律，围绕表面C的线积分同样会趋近于零。

需要注意的是，传输线与接地层之间的空间不能为零（否则会导致外部场为零）。在RF和高速数字应用中，通常使用50 Ω的传输线以最大化信号带宽。而对于电源电路，则使用阻抗低得多的设计，通常仅为几欧姆。

值得注意的是，所有这些物理知识可归纳为三个良好实践，在布局过程中应遵循这些实践。下一部分将逐一介绍各个实践。

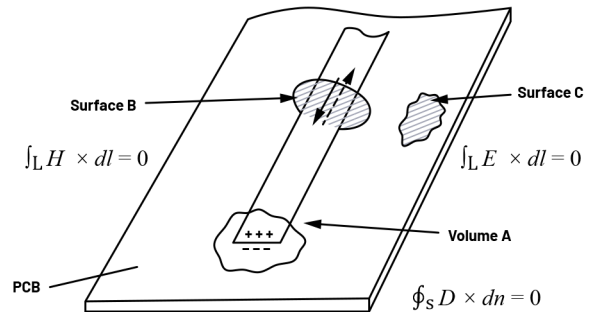


图1. 传输线路周围的电场和磁场示意图。

良好实践

#1追求零净加速电荷

该实践鼓励设计人员关注PCB设计中的电流路径。根据法拉第定律，考虑电路板布局是否允许自然提供抵消电流。请记住，任何电流的存在都意味着它在某一时刻经历了变化，才能达到当前的值。

#2设计布局时，将电场和电磁场约束在特定的较小区域内

这是第一个实践的应用结果。如果布局设计能够实现零净加速电荷，那么电场也会被有效地限制在特定区域内。在布局过程中，设计者需要特别关注这一点，因为无论是电场还是磁场，都是能量传输的必要条件。

#3关注电磁场，而非仅仅关注电压和电流

能量和信息是通过电磁场实现的，而不是通过PCB上的铜线。如果微带线有瑕疵，那么完全消除外部电磁场是不可能的。传输线路阻抗越大，场受到的约束就越少。幸运的是，阻抗较高的线路（最大带宽时阻抗为50 Ω ）通常以较低的电流工作，其初始值限制为电压除以50 Ω 特性阻抗。电源层的阻抗较低（这是理想状态），但以较高的电流运行（这不太好），并且需要处于欠阻尼状态（即具有最小的实际电阻），否则损耗会太大。这些高Q电路会产生显著辐射，这一问题将在后续文章中详细讨论。从EMI的角度来看，自然现象实际上是在帮助设计者，而不是制造障碍——电荷总是会消耗最少能量（无论是存储还是耗散）的方式排列。

由于磁耦合或静电耦合（互感和互容），PCB布局会引起EMI和干扰。这种耦合现象的产生，主要是因为PCB上用于传输能量和信息结构并不完美，无法像同轴电缆那样完全约束电磁场。波导（走线和接地层）之间的空间（电介质）将导致干扰和EMI，除非该几何结构能够完全约束场。

下一篇文章将深入讨论实际电路板布局，介绍由于不完善的布局技术而导致的辐射源，并提供改进方法。我们将分析以下PCB布局中常见的情况。

在PCB上，发生以下情况时，通常会失去场约束：

- 信号在层间转换
- 信号在公共接地层上方共用相同的空间
- 信号在共用接地层上方相互交叉
- 信号并行运行
- 出现场边缘
- 信号沿微带线或其他有缺陷的传输线路传播

结论

本文介绍了为低辐射和EMI合规性测试设计电路板布局所需的基本物理知识和思维过程。通过分析，我们了解到只有电场可以作用于电荷，运动电荷产生的磁场实际上是一种相对论电场。电荷加速时，麦克斯韦方程组和坡印廷矢量揭示了场如何在自由空间中传播。所有PCB铜几何结构均可视为传输线路，能够利用场对电荷的影响，将其约束在PCB的特定区域内。本文第2部分在此基础上，介绍了如何布局PCB以尽可能减少无约束场。这些无约束场正是干扰和EMI的主要来源。无约束场可能有两个来源：电路本身或外界（敏感性）。下一篇文章将分别讨论这两个来源。

只需遵循以下三个良好实践，即可兼顾关键点和所有物理效应。

- **良好实践#1：**追求零净加速电荷。
- **良好实践#2：**设计布局时，将电场和电磁场约束在特定的较小区域内。
- **良好实践#3：**关注电磁场，而非仅仅关注电压和电流。

无论是运动电荷还是静止电荷，任何电荷分布都会自行排列，从而尽可能减少因电荷分布而存储或耗散的能量。

参考文献

Richard P. Feynman、Robert B. Leighton和Matthew Sands。《费曼物理学讲义》，盒装：新千年版。Basic Books，2011年1月。

Johnson, Howard W.和Martin Graham。《High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic》，PTR Prentice Hall，1993年4月。

Ralph Morrison。《Fast Circuit Boards: Energy Management》，John Wiley & Sons Publications，2018年1月。

作者简介

James Niemann于2020年3月加入ADI公司，目前担任现场应用工程师，在美国俄亥俄州克里夫兰工作。James拥有35年的丰富工作经验，曾从事测试与测量设备设计工作，目前担任ADI现场应用工程师。他持有14项专利。

技术文章

一次通过EMI合规性测试—— 第2部分：PCB辐射示例

James Niemann, 现场应用工程师

摘要

对于任何需要高速时钟的产品设计，电磁兼容性(EMC)合规问题可能是一大困扰。本文从电磁(EM)场定向的角度概述了印刷电路板(PCB)设计，旨在帮助读者一次性通过电磁干扰(EMI)测试。用于降低EMI的技术也将减轻干扰，这体现了通用的PCB布局理念。本文分为三个部分。第2部分通过几个PCB互连示例，清晰地说明了如何实施第1部分提出的技术。最后，第3部分将讨论满足所提议解决方案的复杂电路板的PCB布局策略。

简介

为了说明为什么需要使用传输线来约束布局中的场能量以管理电磁干扰(EMI)，第1部分介绍了所有必要的物理知识。文章最后简单列出了需要应对的常见印刷电路板(PCB)布局挑战，如下所示。

在PCB上，发生以下情况时，通常会失去场约束：

1. 信号在层间转换
2. 信号在公共接地层上方共用相同的空间
3. 信号在共用接地层上方相互交叉
4. 信号并行运行
5. 出现场边缘效应
6. 信号沿微带线或其他有缺陷的传输线路传播

针对这些问题，本文通过两个例子，剖析了甚至连经验丰富的工程师也容易忽视的最常见PCB辐射来源。

传输线会产生辐射

假设有一个逻辑门，其输出电压即将升高。而IC的去耦电容就在附近，那么即将被利用的能量应储存在哪里呢？它储存在本地，即去耦电容内部的电介质（空间）中。接下来，设想IC将电荷移动到先前处于地电位的输出引脚，从而提高其输出电压。移动的电荷会产生一个电磁场，该电磁场以光速向外传播，并对遇到的其他电荷施加力。幸运的是，接地平面是最近的电荷源，而且它具有良好的导电性，只需要很少的能量就能在走线正下方产生一个抵消电荷。电场可确保该抵消电荷尽可能接近逻辑门提供的原始电荷。从此时起，在这个小偶极子之外的较远位置，电磁场将接近于零。而且，距离这两个相互抵消的电荷越远，时间越长，电磁场就越接近于零。对于加速电荷产生的电磁场，去耦电容中以及输出走线和接地平面之间发生电压转换的电介质中，都会出现位移电流。整个电气小环路中都存在加速电荷（其中一部分由变化的电场提供，即电流）。当电流环路的尺寸相对于观察距离而言很小时，环路加速段的电磁效应会相互抵消。因此，从远处看，净加速电荷似乎为零。

法拉第定律描述的相对论场对于理解EMI至关重要。所有电荷都有库仑场，但当电荷移动（相对而言）和加速时，还会产生其他两种电场，这些电场共同形成总电场。运动和加速会“扭曲”库仑场，使其变成三个分量之和。当电荷作相对运动时，狭义相对论的空间压缩效应会使原本电中性的电路出现净电荷。从数学上讲，这种现象被称为磁场，而其本质是相对运动产生的电场。第三个电场，也是最后一个电场，源于电荷的加速，其与原始加速度方向相反且垂直。这两个额外电场中包含的能量与库仑场中储存的能量不同。磁场和横向电场都是相对论效应的产物，这意味着，它们所蕴含的能量会因情况而异。只有在正交维度视角下，能量才具有真实意义，这导致了一个有趣的结果：空间的一个维度似乎消失了。库仑场的能量储存在三维空间中，而这种横向场的能量则存在并储存于二维空间中。根据法拉第定律，这意味着当存在该横向场时（即当电荷加速时），沿任何闭合路径计算的电场线积分将不为零。这也意味着，该能量随距离衰减的速度比库仑场要慢，其扩散是基于表面积，而非体积。

源于加速电荷的横向场会产生一个相反的场，这个场也会作用于接地平面中的电荷。接地平面中的电荷基于所有三种电力的叠加而移动，净效应导致抵消电流从所需的方向移动，以消除原始加速电荷的变化磁场。掌握了这些知识，我们就能准确预测信号前沿沿传输线传播时会发生什么。当位移电流沿传输线移动时，去耦电容以及传播前沿之前的传输线会看到固定的前向和返回电流。然而，微小电气片段（长度等于信号走线和接地平面之间距离）沿着传输线传播时，只有波前沿的位移电流才会产生辐射。这段位移电流没有闭合的回流路径，所以它产生的电磁场会扩散，引起辐射和EMI。如前所述，前沿之前和之后的传输线部分不会产生任何电活动。传输线上电压发生变化的位置所发生的位移电流，是一种经常被忽视的常规辐射源。这段非常微小的加速电荷可能看似无关紧要，但在复杂的电路板上，会有成千上万条传输线在同一时钟信号下运行。通常情况下，同频时钟产生的辐射会在网络分析仪上以复杂的方式相互叠加，进而可能会形成一个相当可观的辐射源。

谐振电路

除了不理想的传输线之外，普通PCB上还存在着大量谐振电路。这些都是必要的模拟连接，包括运算放大器输入/输出网络、开关电源互连、测量路径等等。问题是，对于大多数设计人员而言，它们与传输线并没有什么区别。我们可以通过将传输线端接电容（或短路），而不是电阻，来将一个正确端接的传输线转变为谐振电路。经过这一简单的改变，整个电路现在仅包含电抗元件，即传输线的L和C以及容性或感性终端。如果线路足够长或容性端电极足够大，此电路便可能在较低频率产生谐振，进而影响电磁辐射。尤其当线路中的电流很大时，这种影响尤为显著。电流越大，产生的辐射也越强。

在正确端接的传输线中，对于每个边沿，能量只会单向传输一次。即使对于0.66倍光速的长传输线，哪怕PCB走线非常长，这段小小的辐射也不会持续太久。参见图1。相比之下，谐振电路没有任何电阻来消耗能量，因此当输入一个阶跃信号时，线路会以 $1/2\pi\sqrt{LC}$ 的频率持续振荡，直到能量以辐射的形式散发出去。

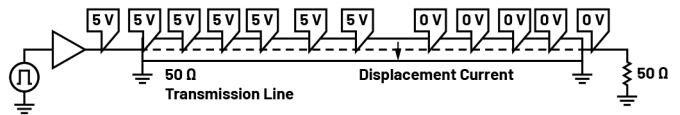


图1. 对于正确端接的传输线，由于电场变化产生位移电流，在信号转换的地方将会发生辐射。

最麻烦的谐振电路莫过于开关电源上的热环路。图2为两种开关电源布局。大多数工程师会认为第二种布局很好，但实则不然。热环路是一个高Q谐振电路，由一些低电阻互连线组成，一端端接至阻抗非常低（高电容）的电源，而另一端连接至降压MOSFET，如图所示。简化电路和仿真如图3所示。虽然几纳亨的电感和下方400 pF Cds的MOSFET，看似不会在CISPR B级频率范围内产生谐振，但实际上却会产生显著谐振。此电路简直是噪声产生的“完美风暴”。

- 因为谐振电路恰好位于EMI合规要求的频率范围内。
- 它是一个串联谐振电路，在谐振时会短路（使电流最大化），并且由低电感电压源驱动。

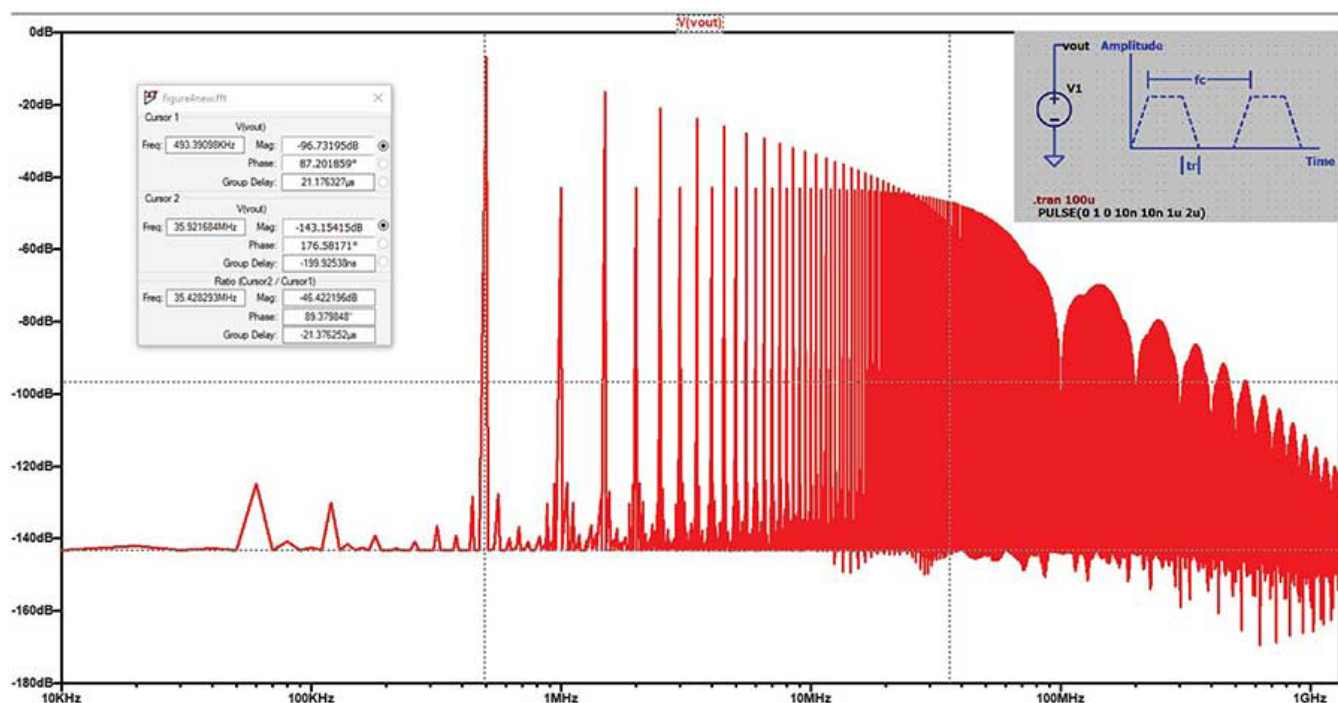


图4. 对非理想方波的傅里叶分析表明，每个奇次谐波中都存在能量。这个实际波形也有两个拐点。一个位于 $f = 2 f_c / (\pi)$ (20 dB/dec)，另一个位于 $1 / (\pi) t_r$ (40 dB/dec)。

- 它由高压方波驱动，方波信号包含显著的谐波成分，并且频率接近谐振频率。谐振频率附近总是伴随着一定的谐波成分。
- 由于电路的Q值较高（实部电阻非常低），因此能量会在电感和电容之间来回震荡，直到所有能量以辐射的形式耗散殆尽。
- 同步MOSFET的慢速高电容（高于C_{ds}）体二极管会使开关导通时的初始电流最大化。例如，对于V_{IN} = 48 V的降压转换器，体二极管在短1 ns的时间内就可能经受48 V的电压。对于C_{ds} = 400 pF（不考虑同步开关的导电体二极管的电感和反向恢复电荷），初始电流将为 $i = C dv/dt$ ，既约20 A。该电流仅受电感L限制。

由于初始电流非常高，最终在电路谐振频率附近的谐波中会存储大量能量。这就是为什么对于不同设计中的相同降压控制器，在相同频率下工作时，也会在各种位置出现电磁辐射超标问题。辐射的位置与串联LC谐振电路的短路点密切相关，同时也受到谐波电流成分的影响。降低基频电流（降低电压）或降低开关电源(SMPS)基频（以较低频率运行转换器）会有所帮助，因为这样做会衰减有害谐波。将摆率降至谐振频率以下，也能起到改善作用。参见图3。为了避免这个问题，可以提高该谐振电路的频率，进而可以消除热环路。在较高谐振频率下，谐波成分会低得多（见图4），较小的电感和电容储存的能量也会较少。

同样的问题也存在于栅极导通电路中，但程度要小得多。对于该电路，可以添加10 Ω 的栅极电阻来抑制振荡，并将元件布置得更紧凑以降低电感，从而实现阻尼效果更好、谐振频率更高的环路。

需要注意的是，电路板上的直流电源系统必须采用低阻抗传输线构建。当传输线阻抗 $\sqrt{L/C}$ ，呈现低特性阻抗时，意味着电感(L)较小而电容(C)较大。这可以通过缩短供电走线与接地回路之间的距离来实现。这种几何结构能为所有接收电力的电路提供更大的能量管道。导体之间距离非常近，因此该结构提供的外部磁场非常小。而由于所有磁场都集中在一个较小的空间中，内部的磁场强度会大大增强。由于薄电介质的存在，电场也会很高，因此坡印廷矢量所描述的功率流 $P = E \times H$ 也会很大。PCB制造工艺存在限制，因此只能通过使用多层电源和接地平面对来降低电路板阻抗，从而改善上述情况。请注意，特性阻抗较高的线路仍然能够传输大量能量。然而，为实现此目的，必须增加线路面积。因为在相同电压和电流条件下，电介质中的电场(E场)和磁场(H场)强度会降低。电感越大，改变储存能量所需的时间就越长（负载电流更大），但对于该固定电源，电容上的线电压根本没有变化。这意味着，当需要快速改变功率流时，较低电感的线路会更加灵活。

回顾引言中列出的常见PCB布局挑战，很容易看出上述示例中这些缺陷是如何在不经意之间引入的。在布局中，为调整电路层而暂时断开传输线是很常见的。这种层变化很容易引入一段传输线（过孔距离），若不在此附近设置接地缝合过孔，该传输线就不会有回流路径。对于多层电路板，如果多个信号层共用一个接地平面，设计性能可能会受影响。在紧凑型电路板中，走线可能在同一接地平面上长距离平行布线。无论哪种做法，都会导致不同信号产生的电磁场相互影响，造成干扰。最后，与上面描述的过孔类似，微带传输线同样无法限制信号传播前沿的磁场。该能量会在电路板平面上自由辐射。

在第3部分中，我们将讨论PCB布局策略，以帮助尽可能地避免各种缺陷。此外，基于本文所呈现的两个示例，第3部分还会增加第三个关于电力传输的例子。

结语

本系列的第一篇文章从电场的角度介绍了布局概念，并阐述了支撑所提出布局策略的基础物理原理。本文是第二篇文章，通过两个PCB互连示例（传输线和谐振电路），说明了一些常见布

局做法如何导致电磁干扰(EMI)问题。不合理的电路布局，即使电流很小，也可能因受影响电路的位置、传输线数量以及电流强度（如SMPS中的热环路）等因素，造成干扰和EMI。用于管理EMI和干扰的技术，也能增强PCB对外部电磁场的抗干扰能力。最后，本文探讨了仅由电抗元件组成的常用谐振电路，当发生谐振时，前文所讨论的缺陷会使其辐射能量。

本系列的下一篇文章将介绍最后一种电路类型，即电力传输电路，并将提出一种兼顾电力和信号传输的复杂PCB布局策略。

参考文献

Richard P. Feynman、Robert B. Leighton和Matthew Sands。费曼物理学讲义，盒装：新千年版。Basic Books，2011年1月。

Howard W. Johnson，Martin Graham。High-Speed Digital Design A Handbook of Black Magic。PTR Prentice Hall，1993年4月。

Ralph Morrison。Fast Circuit Boards。John Wiley & Sons Publications，2018年1月。

作者简介

James Niemann于2020年3月加入ADI公司，目前担任现场应用工程师，在美国俄亥俄州克里夫兰工作。James拥有35年的丰富工作经验，曾从事测试与测量设备设计工作，目前担任ADI现场应用工程师。他持有14项专利。

模拟对话

使用热插拔控制器 增强系统可靠性

Karl Audison Cabas, 产品应用开发工程师

Ralph Clarenz Matocinos, 产品应用开发助理工程师

Christian Cruz, 产品应用高级工程师

摘要

本文探讨了在系统级应用中实施热插拔控制器的优势和好处。热插拔控制器提供了一种先进的解决方案，可无缝插入和拔出电子设备，确保持续运行、防止过流并进行实时监测。通过提供参考设计，用户可以更好地了解关键功能，从而增强这些功能的相关性和重要性。本文重点介绍热插拔控制器如何提高系统可靠性、最大限度地减少停机时间并保护敏感设备，最终优化系统性能并降低维护成本。

简介

在电子产品中，在不中断系统运行的情况下安全地插入和拔出电源模块的能力至关重要。众所周知，热插拔¹已成为从数据中心到电信系统等许多应用的基本功能。为了确保系统在这些操作期间的安全性和完整性，需要专门的控制器。ADI公司的LTC4287在这类产品中具有明显优势。本文深入探讨了这款热插拔控制器在系统级应用中的性能、特性、益处和优势。

LTC4287：强大的热插拔控制器

LTC4287是一款多功能的高性能热插拔控制器，专为在系统实时添加或更换期间保护系统和插入的组件而设计。凭借全面的功能和强大的性能，LTC4287成为了许多关键应用中的重要组成部分。

热插拔要点

热插拔涉及在系统运行时插入或拔出组件（例如卡、电源或驱动器）的行为。这个过程充满挑战，因为需要处理供电轨并确保电压水平保持在安全范围内。热插拔控制器通过提供以下主要功能，出色地解决了这些挑战：

使用RC热电路实现精确限流

热插拔可提供精确限流，在热插拔应用中发挥着至关重要的作用。此功能可确保插入的组件所消耗的电流保持在安全范围内。一旦突发大冲击电流或故障情况，控制器会迅速做出反应，保护系统免受过流事件的影响。用户可以选择使用RC热电路，该电路模拟MOSFET从节到印刷电路板(PCB)的热传导，从而进一步提高限流的准确性。

故障检测与保护

在热插拔场景中，可能由于未对准、组件损坏或其他因素而出现故障。热插拔控制器配备全面的故障检测机制，包括欠压和过压保护。它会持续监测输入侧和输出侧的电压水平，立即采取行动隔离故障并保护系统。

冲击电流控制

在插入电源装置(PSU)期间，由于电容负载，可能会产生高冲击电流，这可能会导致电压下降并影响系统稳定性。热插拔控制

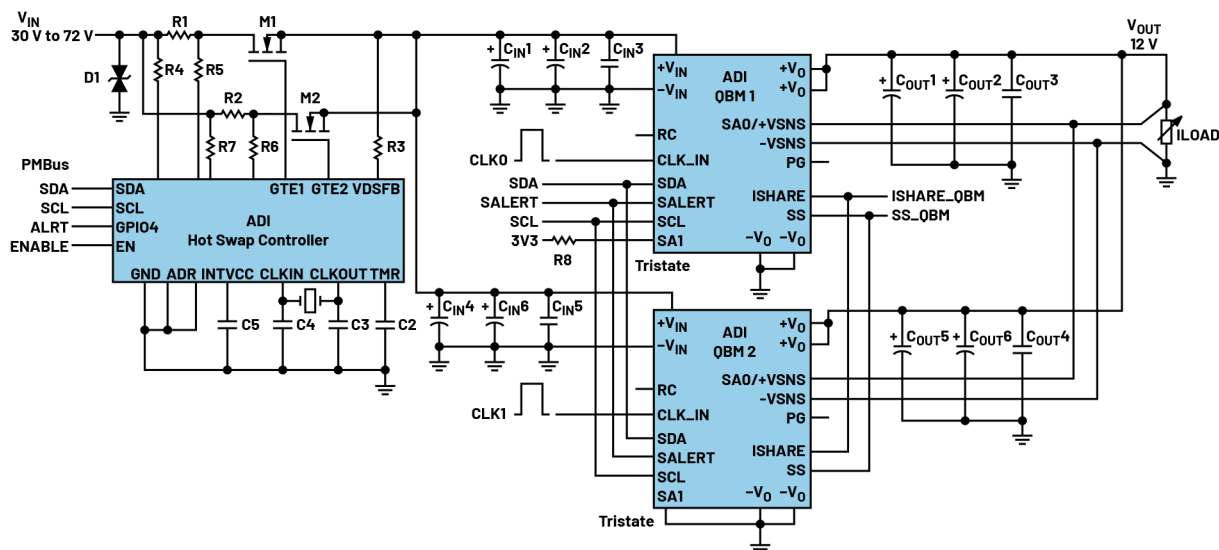


图1. 54 V至12 V系统应用的示意图。

器集成了冲击电流控制功能，可在插入过程中平稳增加电流，以减轻电压波动。这种平稳的启动过程可确保系统中的其他组件保持运行而不中断。

输出电压和电流监测

为了确保插入的PSU正常运行，热插拔控制器通过集成的PMBus®对输出电压和电流进行实时监测。监测数据可传输至LTpowerPlay®进行分析和评估。此监测功能可以快速识别PSU行为中的任何异常，从而有助于快速响应潜在问题。

综合控制

这款热插拔控制器提供了良好的灵活性和可配置性。设计人员可对设置进行自定义，以满足其热插拔系统的特定要求。这种适应性在具有不同PSU需求的应用中尤其宝贵。

系统级性能优势

现在，我们来看一下在系统级应用（特别是54 V至12 V系统应用）中加入热插拔控制器的优势和益处。参考图1。

系统参考设计专门针对并行模式功能进行了设计和优化，从而能够通过热插拔控制器从带电背板上安全地插入和拔出54 V至12 V PSU模块。在正常运行期间，电荷泵和栅极驱动器激活M1和M2 MOSFET，促进电力向负载传输。这些栅极驱动器由热插拔控制器电源(V_{DD})引脚供电，并包括内置14 V栅极-源极钳位，用于外部MOSFET保护。在热插拔控制器中，通过一组比较器（包括欠压(UV)、过压(OV)和启用(EN)比较器）在启用栅极之前验证外部条件。三个欠压保护电路（UVL01、UVL02和UVL03）会验证输入电源并在内部生成5 V电源（INTVCC和DVCC）。当DVCC超过阈值时，UVL03还会触发逻辑电路的上电初始化，并将EEPROM内容读取到操作存储器中。在正常运行期间，热插拔控制器会在启动去抖动延迟后激活外部N沟道MOSFET。

LTC4287提供双级电流保护，利用开尔文电流输入（SENSE+和SENSE-）引脚来监测检测电阻上的负载电流。它具有主动限流和快速限流比较器阈值。快速限流阈值始终设置为标称限流的三倍。当检测电压达到限流阈值时，相关栅极被拉低以接合主动限流环路。如果发生突然短路或输入尖峰达到快速限流比较器阈值，

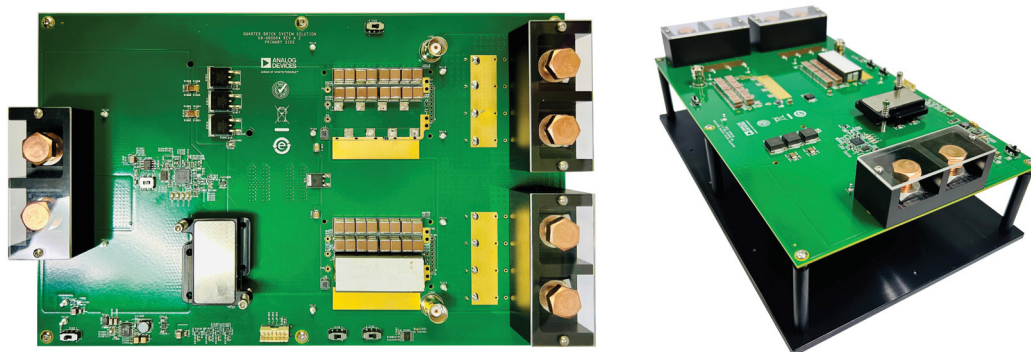


图2. BR-080064，适用于54 V至12 V系统应用的ADI参考设计硬件。

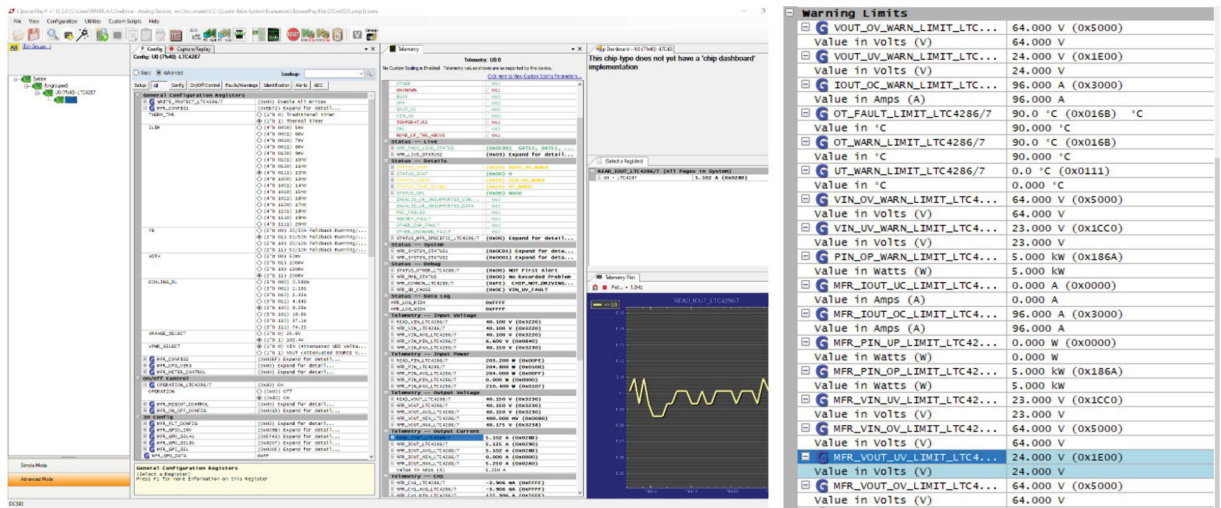


图3. 适用于连接到LTpowerPlay的54 V至12 V系统应用的ADI参考设计。

则相应的栅极立即被拉至源极，从而限制峰值电流。一旦检测电压恢复到限流阈值，主动限流环路就会接管电流控制。

增强系统可靠性

在系统应用中，可靠性至关重要。54 V至12 V PSU模块的热插拔是一个非常精细的操作过程，任何错误或故障都可能导致系统停机或组件损坏。热插拔控制器的精确限流和故障检测机制确保热插拔操作安全进行，从而降低系统中断和组件故障的风险。

图2所示的系统应用参考设计重点展示了LTC4287以及两个能够处理高达4 kW功率的54 V至12 V PSU模块。其中还包含可通过LTpowerPlay®（使用DC1613）访问的PMBus通信功能，以增强控制和监测功能。

无缝维护

在必须保障连续运行的应用中，通常需要定期维护或更换组件。这款热插拔控制器的冲击电流控制和实时监测功能使PSU能够顺利插入和拔出。这意味着无需关闭整个系统即可执行维护操作，从而最大限度地减少停机时间并最大限度地提高系统可用性。

降低拥有成本

无需中断系统运行即可进行组件热插拔，从而可以显著节省成本，可能降低30%至50%。关键应用的停机可能会导致收入或生产力的损失。通过部署热插拔控制器，系统可以设计为最大限度地减少或消除此类中断，从而降低长期总体拥有成本。

广泛适用于多种应用

热插拔控制器并不局限于特定的行业或应用。它可以集成到各种系统中，包括数据中心、电信设备、工业自动化等。它具有良好的适应性，能够在不同场景中提供保护和控制，因而成为系统级应用的多功能解决方案。

实时监测和数据收集

除了保护功能外，热插拔控制器还提供实时监测功能，可提供丰富的信息。这些监测数据对于系统诊断、性能优化和预测性维护非常有价值。通过分析这些数据，系统操作员可以做出明智的决策，并在潜在问题恶化之前主动加以解决。

系统应用示例中包含一个热插拔控制器和PMBus协议通信（参见图3），提供了用户友好的可访问性。当配置了GPIO引脚时，可以实现读取A/D寄存器、故障检测和通过ALERT#中断进行实时响应等任务。PMBus设备的辅助地址由ADRO和ADRI1引脚决定，每个引脚提供三种状态（接地、INTVCC或保持开路），总共提供9个设备地址。

简化系统设计

这款热插拔控制器功能全面，使系统设计得以简化。设计人员可以依靠这款控制器来管理热插拔操作，从而降低系统其余部分的复杂性。这种简化可以缩短开发周期并减少设计工作量。

54 V至12 V系统解决方案的电气性能和结果

在系统参考设计中，对这款热插拔控制器在多种测试条件下的性能进行了评估：

参数：系统应用的电气指标

输入电压范围：40 V至60 V

负载电流：0 A至130 A

工作温度：0°C至60°C

在评估热插拔控制器时，根据特定应用的要求，需要考虑几个关键参数和指标。以下是一些需要评估的重要参数：

过流保护

热插拔控制器采用多级方法来提供强大的过流保护。首先，它采用具有预设阈值的主动限流(ACL)。

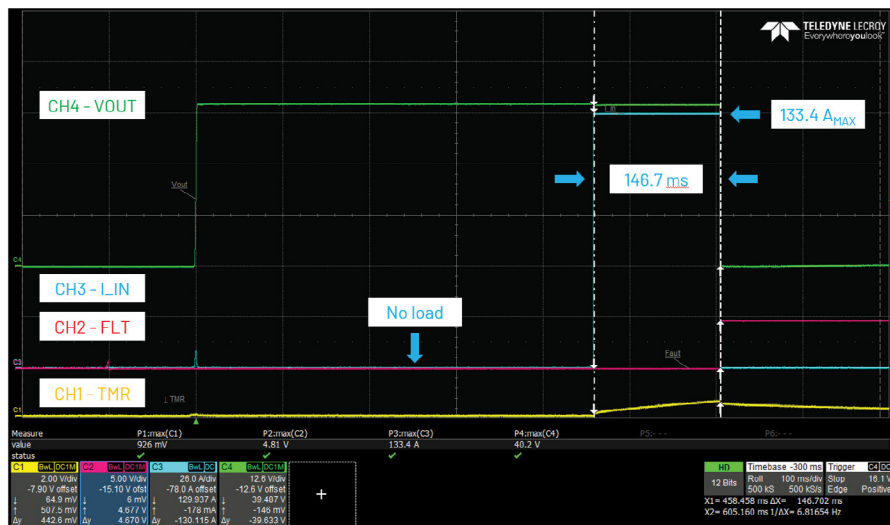


图4. 限流保护，输入电压40V，负载电流0A至130A。

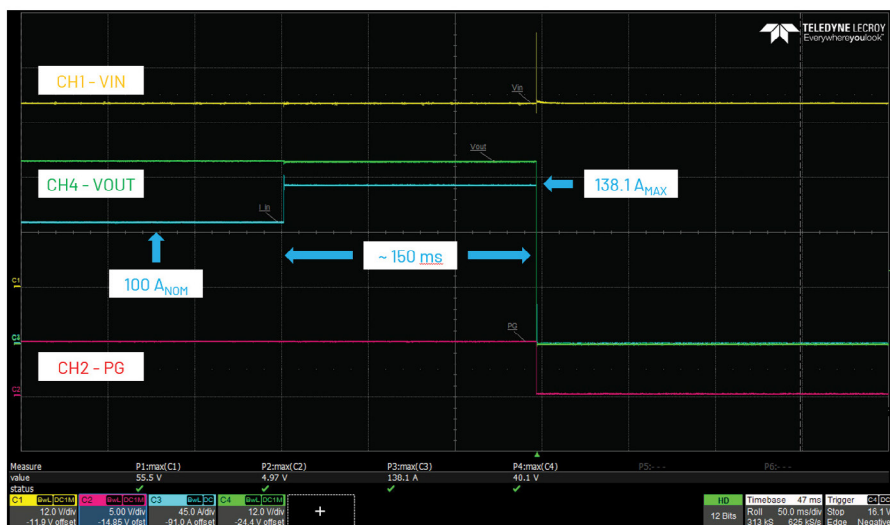


图5. 短路保护。输入电压为40V，负载电流为100A至130A。

当负载电流超过此限制时，控制器会主动调节输出电压，抑制电流并防止问题进一步加重。其次，快速限流比较器作为主动限制的补充，能够立即对突发的高幅度过流（例如短路）做出反应。它会迅速拉低MOSFET栅极，限制峰值电流以保护电路免受损坏。此外，这款控制器支持故障报告和恢复。如果发生过流，它会通过指定的通用引脚(GPIO)报告故障，这些引脚可以与LED相连以指示故障。故障解决后，它就会促进受控恢复，逐步恢复对负载的供电，以安全地恢复正常运行。图4显示了如何对参考设计进行编程，以便在线路电流超过128 A时快速做出反应，同时锁定输出以防止发生潜在的危害。当达到限流时，热插拔控制器的故障引脚会被激活。

短路保护

LTC4287配备多级短路保护系统，以确保短路事件期间PSU模块的安全。首先，它能够立即响应短路，具有快速限流比较器，可对突发的高幅度短路情况做出迅速反应，包括快速下拉MOSFET开关栅极以限制峰值电流并保护电路。此外，还实施了主动限

流机制，为正常运行建立了预定义的限流阈值。如果短路电流超过该阈值，控制器将通过主动调节输出电压进行干预，以将电流降低至安全水平。

如图5所示，如果在正常运行期间发生短路，这款热插拔控制器会立即断开输入与输出，从而提供即时保护。然后，它会发送一个信号，表示已触发故障，具体以故障信号和电源良好(PGOOD)信号表示。这确保了输入线路之间能够得到充分的隔离。这种综合方法可保证系统在短路情况下的安全性和弹性。

冲击电流控制

热插拔控制器中集成了热冲击电流管理，以限制热插拔FET上因上电期间电流浪涌而引起的热相关故障，确保安全启动。它通过测量串联电流检测电阻两端的电压来检测电流的上升情况。软启动电路逐渐增加输出电压，最大限度地降低超出MOSFET安全工作区(SOA)的电压上升速率和电流尖峰。当检测到启动短路时，定时器(TMR)引脚中编程的SOA定时器输出会逐渐增加到大于2.56 V的TMR阈值。热插拔控制器会自动断开线路而不激活保护MOSFET，

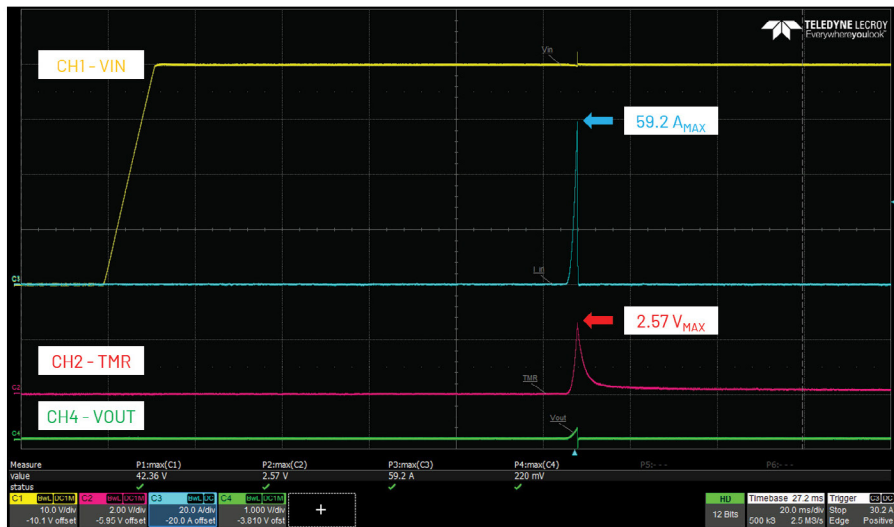


图6.40 V输入电压时的启动短路保护。

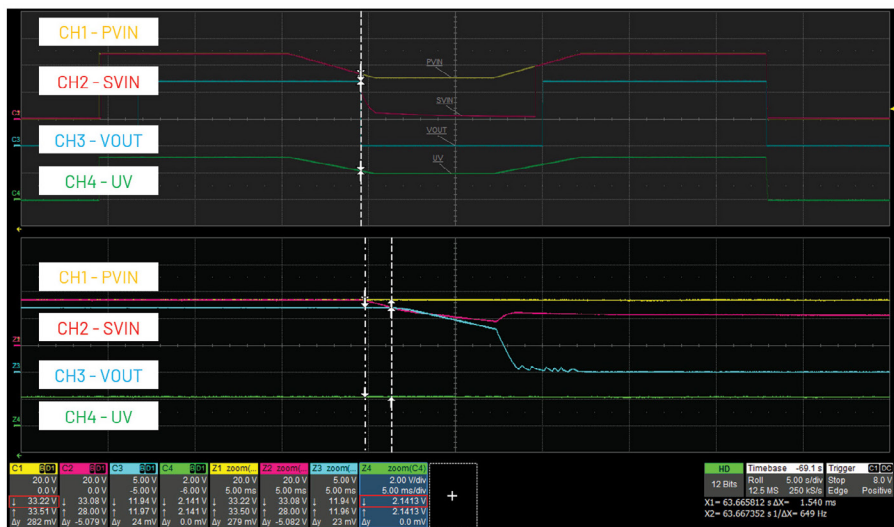


图7.33 V输入电压时触发欠压保护(UVP)。

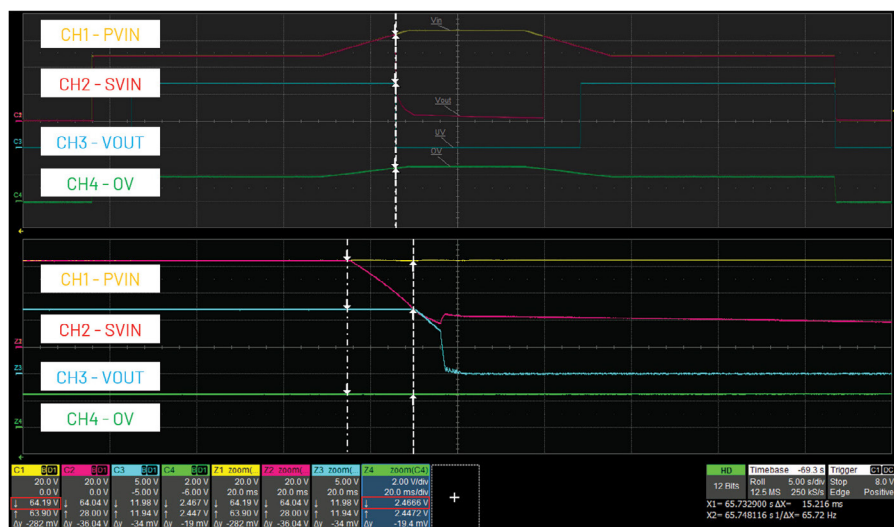


图8.64 V输入电压时触发过压保护(OVP)。

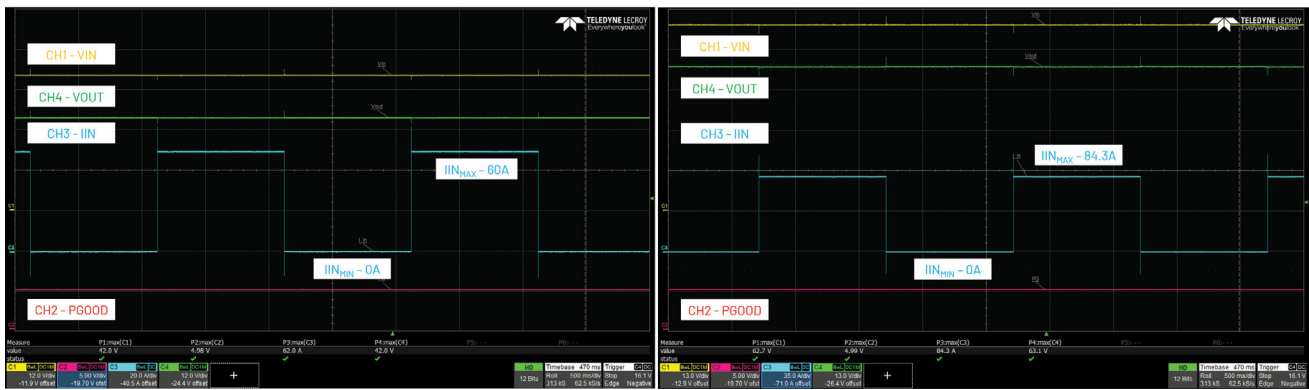


图9. 输入电压为40 V和160 V时，2 kW负载下的负载瞬态响应。

如图6所示。这样就保证了系统的安全运行。这些关键元件可实现平稳有序的上电过程，提高系统可靠性和使用寿命，同时减少电压尖峰和浪涌。

总之，这款热插拔控制器通过管理热冲击电流和限制浪涌来确保安全启动。它使用电流检测电阻来检测增加量，采用软启动电路来最大限度地减少尖峰，并在发生启动短路时自动断开线路，从而增强系统安全性。这些元件可保证平稳上电，提高系统可靠性和使用寿命，同时降低电压尖峰。

电压监测

热插拔控制器具有内置电压监测功能，可确保54 V输入到12 V系统应用的安全稳定。它会持续跟踪电压水平以进行欠压和过压检测，提供关键保护。它会评估热插拔MOSFET后的输入和输出电压，并在电压低于欠压阈值时做出响应，从而防止出现操作问题。同样，如果它感应到电压超过了过压限制，就会启动保护措施来保护组件免受潜在损坏。这种主动响应可防止因电压波动而导致的性能问题，从而确保系统的可靠性和耐用性。电压监测数据存储在控制器内置的EEPROM中。

图7说明了热插拔控制器的欠压保护机制，当UV引脚的电压低于阈值（测量值为2.14 V，相当于PVIN电压33 V）时，会使设备停止运行。图8则显示了过压保护机制，当OV引脚的电压超过阈值（测量值为2.47 V，对应PVIN电压为64 V）时，会关闭设备。当输入电压恢复正常时，控制器会自动重试并恢复。可以通过修改UV和OV引脚上的电阻分压器值来调整阈值。

温度监测

LTC4287利用远程晶体管作为传感器来实时监测温度。这样便可以收集温度数据以进行系统健康评估和保护。

故障报告和指示

借助LTpowerPlay，这款热插拔控制器可以有效地监测和解决系统中的任何故障和异常，确保有效的管理和维护。

负载瞬态响应

这款热插拔控制器具有出色的瞬态响应，可确保动态负载变化时系统的稳定性。它会持续监测输出电压，防止电压波动并保护系统中的敏感元件，如图9所示。

准确性和精确度

这款热插拔控制器结合了高质量组件、校准、温度补偿、降噪、反馈回路和数字通信功能，实现了出色的准确性和精确度。这些特性共同确保了测量的可靠和一致，有助于提高系统应用的整体准确性和精确度。图10显示了LTC4287输出功率读数与测试设备测得的数据的比较。

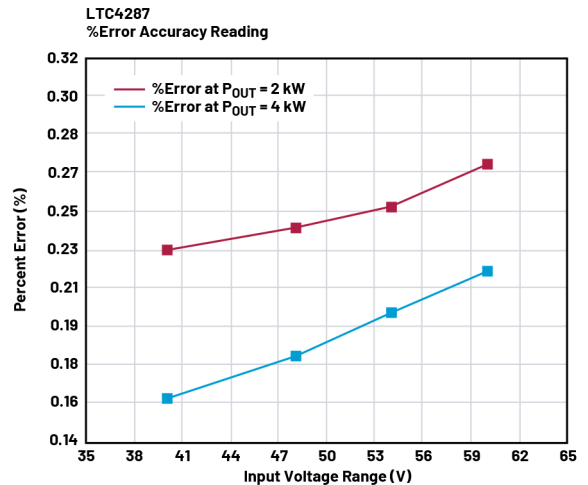


图10. 2 kW和4 kW功率负载之间的百分比误差精度。

校准过程对于确保热插拔控制器测量的准确性和精确度至关重要，这对于重视数据可靠性和一致性的系统应用尤为重要。通过在制造过程中校准控制器并提供用户校准选项，LTC4287提供非常准确和精确的电压和电流测量，有助于提高系统应用和PSU模块的整体性能和可靠性。

通过仔细评估可用参数和测试条件，这款热插拔控制器可满足系统应用和其他大电流应用的要求。

此外，还应考虑加入一个强大的辅助电路，以便有效地为系统内的各种内部外设供电。在系统应用中，参考设计已经利用LT8631来提供稳定的5 V电压，利用LT3009确保可靠的3.3 V供电。

结论

ADI的LTC4287热插拔控制器是一款强大的电源管理产品，可提高系统可靠性、减少停机时间并在系统级提供众多优势。它具有故障保护、控制冲击电流和提供实时监测的能力，是各个行业关键应用中不可或缺的组件。通过引入这款热插拔控制器，系统设计人员可以确保顺畅、高效的热插拔操作，从而提高系统可用性并降低总体拥有成本。

此外，本文还初步介绍了54 V至12 V PSU模块的参考设计；相关团队正致力于撰写一篇详尽的文章来阐述优势和益处。

参考文献

¹ “[了解、使用 and 选择热插拔控制器](#)”。ADI公司，2003年12月。

作者简介

Christian Cruz是ADI（菲律宾）公司的产品应用高级工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电气工程学士学位。他在电力电子和电源控制固件设计领域拥有14年的工程经验，包括电源管理解决方案开发及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前专注于研发消费和云端基础设施事业部及系统通信应用所需的电源管理解决方案。

Karl Audison Cabas自2020年9月起担任ADI公司的应用工程师，专注于电源应用方面的工作。他拥有菲律宾理工大学电气工程学士学位和玛布亚大学电力电子硕士学位。他在DC-DC电源转换器方面拥有4年多的经验。他之前的职责是处理客户问询以及与DC-DC转换器相关的设计问题。他目前担任云和数据中心应用的电源系统应用工程师。

Ralph Clarenz Matociños毕业于菲律宾马尼拉Pamantasan ng Lungsod ng Maynila (PLM)，获电气工程学士学位。他在电力电子领域拥有一年多的工程经验，包括电池管理系统开发和DC-DC电源转换。他于2022年加入ADI，目前担任云和数据中心应用的电源系统应用工程师。

模拟对话

带耦合电感的多相降压转换器中关于输出电流和电压纹波的考量因素

Alexandr Ikriannikov, ADI公司院士

摘要

多相耦合电感器是一项很有前景的技术，由于每个耦合相内的电流纹波得到消除，为系统带来了显著的优势。而令人意想不到的是，无论是耦合电感器还是非耦合电感器，多相降压转换器的总输出电流纹波都是相同的。本文重点探讨输出电流纹波的考量因素，以及影响输出电压纹波和整体转换器性能的具体细节。

简介

多相降压转换器是广泛用于具有高输出电流的降压型应用的拓扑结构。基于这种电路的电压调节器可用于服务器、人工智能、数据中心、云计算、通信、汽车等领域。

电感器中的电流纹波是影响设计方案选择的重要参数，它会影效率、输出电压纹波、瞬态性能、解决方案尺寸和其他性能指标。本文将重点讨论这些关于电流纹波的考量因素。

采用分立电感(DL)的传统多相降压转换器如图1a所示。图1b显示了用耦合电感(CL)替代DL的替代方法¹⁻⁹。为实现波形的美好交错，确保所有转换器相位(1至 N_{ph})之间的相移非常重要。这种相移通常可以最大限度地减少进入输出电容 C_o 的总输出电流纹波，从而最大限度地减少输出电压纹波。另外，还需要适当的相移才能获得CL的理想性能。

常规降压转换器各相的电流纹波可由公式1求出，其中占空比 $D = V_{OUT}/V_{IN}$ ， V_{OUT} 为输出电压， V_{IN} 为输入电压， L 为电感值， F_s 为开关频率。假设将分立电感替换为具有相同值(L ，现为漏感)的耦合电感并增加互感 L_m ，则CL中的电流纹波可表示为公式2⁶。品质

因数(FOM)表示为公式3，其中 N_{ph} 是耦合相的数量， ρ 是耦合系数(公式4)， j 是定义占空比适用区间的运行指数(公式5)。

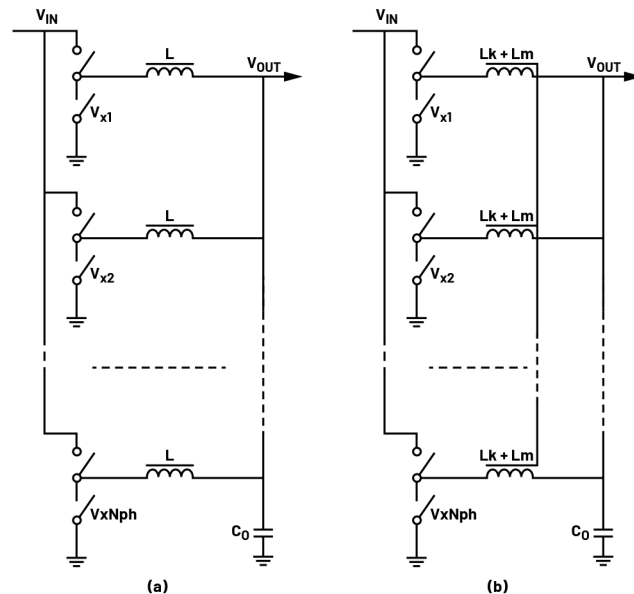


图1. 多相降压转换器，采用(a)分立电感DL和(b)耦合电感CL。

$$dIL_{DL} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} \times \frac{D}{F_s} \quad (1)$$

$$dIL_{CL} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} \times \frac{D}{F_S} \times \frac{1}{FOM(D, N_{ph}, \rho, j)} \quad (2)$$

$$FOM = \frac{1 + \frac{\rho}{\rho + 1} \times \frac{1}{N_{ph} - 1}}{1 - \left[(N_{ph} - 2 \times j - 2) + \frac{j \times (j + 1)}{N_{ph} \times D} + \frac{(N_{ph} \times D \times (N_{ph} - 2 \times j - 1) + j \times (j + 1))}{N_{ph} \times (1 - D)} \right] \times \frac{\rho}{\rho + 1} \times \frac{1}{N_{ph} - 1}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{L_m}{L} \quad (4)$$

$$j = \text{floor}(D \times N_{ph}) \quad (5)$$

一般来说, CL展现出更大的FOM⁶, 表明与DL (公式1) 相比, 在电流纹波消除 (公式2) 方面具有明显优势。换言之, 电感L的相同瞬态性能将导致使用CL时的电流纹波明显变小, 从而有可能降低F_s以实现更高的效率。或者, 可以降低电感值以获得更快的瞬态响应和更小的磁性和输出电容。因此, 可以在多个方面利用CL的优势, 例如减小解决方案尺寸或显著提高效率。

输出端的总电流纹波

当多个电感电流流入同一网络时, 交错式多相转换器具有降低总电流纹波的优势^{10,11}。对于多相降压转换器, 通常可以减少流入输出电容(C_o)的总交流电 (公式6)。降低输出电容中的交流电通常是有益的, 因为这样可以降低输出电压纹波并略微提高效率。此外, 还可以观察到输入电容纹波的改善。然而, 本文主要关注电感中的电流纹波及其对输出的影响。

$$dILO = \frac{V_{OUT}}{L \times F_S} \times \left(1 - \frac{j}{N_{ph} \times D} \right) \times (1 + j - N_{ph} \times D) \quad (6)$$

DL相位的电流纹波 (公式1) 在D = 0.5时将具有最大幅度。用最差值进行归一化 (公式6) 可以消除电压、频率和电感, 并绘制归一化 (相对) 总电流纹波曲线, 作为占空比的函数 (公式7)。当然, 前提是假设所有消除的电路条件保持不变。

$$dILO_{NORM} = \frac{D}{0.25} \times \left(1 - \frac{j}{N_{ph} \times D} \right) \times (1 + j - N_{ph} \times D) \quad (7)$$

多相降压转换器中的总归一化输出电流纹波用公式7表示, 并在图2中直观显示。值得注意的是, 当N_{ph} = 1时, 等于单相电流纹波, 这与预期一致。当更多相 (1至N_{ph}) 并联且各相之间的相移为360/N_{ph}度时, 通常会产生相应更高的输出电流和功率。然而, 图2显示, 进入输出电容的总电流纹波同时急剧下降。这凸显了交错多相的优势之一, 即可以获得更好的系统性能, 这适用于DL和CL配置。虽然非耦合DL和CL各相内的电流波形可能看起来不同, 但总电流 (多相降压转换器中的总输出电流) 呈现相同的波形。事实上, 公式6和7对DL和CL降压转换器都适用 (不同的是CL需要N_{ph} > 1)。图3、图4和图5显示了降压转换器六个相中的仿真电流纹波, 其中V_{IN} = 12 V、V_{OUT} = 1.0 V (D = 0.0833)、L = 50 nH、F_s = 600 kHz。底部的红色曲线代表输出端的六相电流纹波。图3a对应于分立电感的情况L_m = 0 (DL = 50 nH), 图3b引入了较小的L_m = 20 nH (CL = 6 × 50 nH)。进一步增加耦合, 图4a的L_m = 50 nH, 图4b的L_m = 200 nH。后者对应于现成的六相耦合电感CL1010V1-6-R050-R; CL = 6 × 50 nH, L_m = 200 nH。最后, 值得注意的是, 图5a和图5b所描绘的情况其实不切实际, 因为分别实现非常大的L_m = 1 μH和L_m = 10 μH异常困难。

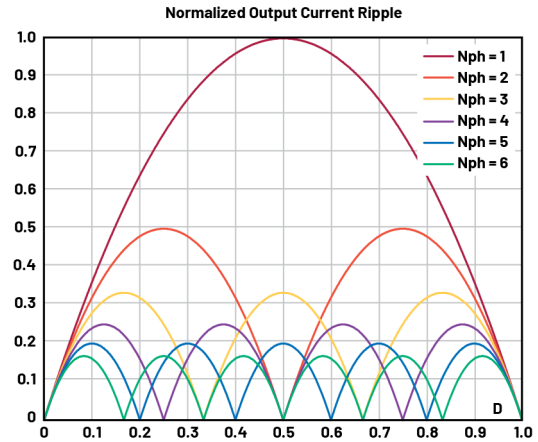


图2 多相降压转换器中的归一化总输出电流纹波(7)是占空比D的函数。

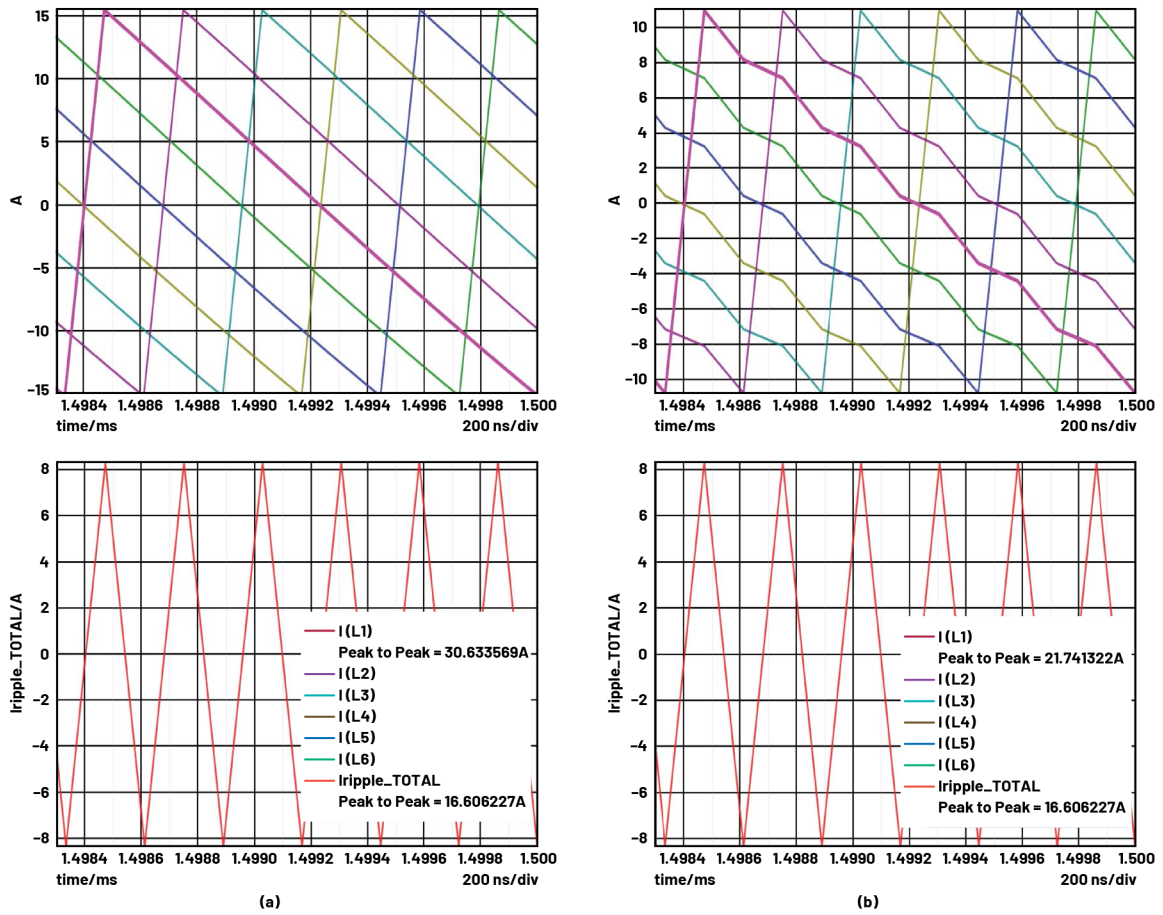


图3.6相12V至10V降压转换器的单个电感电流（顶部）和总输出电流（底部红色曲线），其中 $F_s=600\text{ kHz}$ 。(a)分立 $DL=50\text{ nH}$ ($L_m=0$)，(b) $CL=6 \times 50\text{ nH}$ ，且 $L_m=20\text{ nH}$ 。为了清楚起见，突出显示了第一个相位的电流 $I(L1)$ 。对于任何 L_m 值，输出电流纹波均为相同的16.6 A。

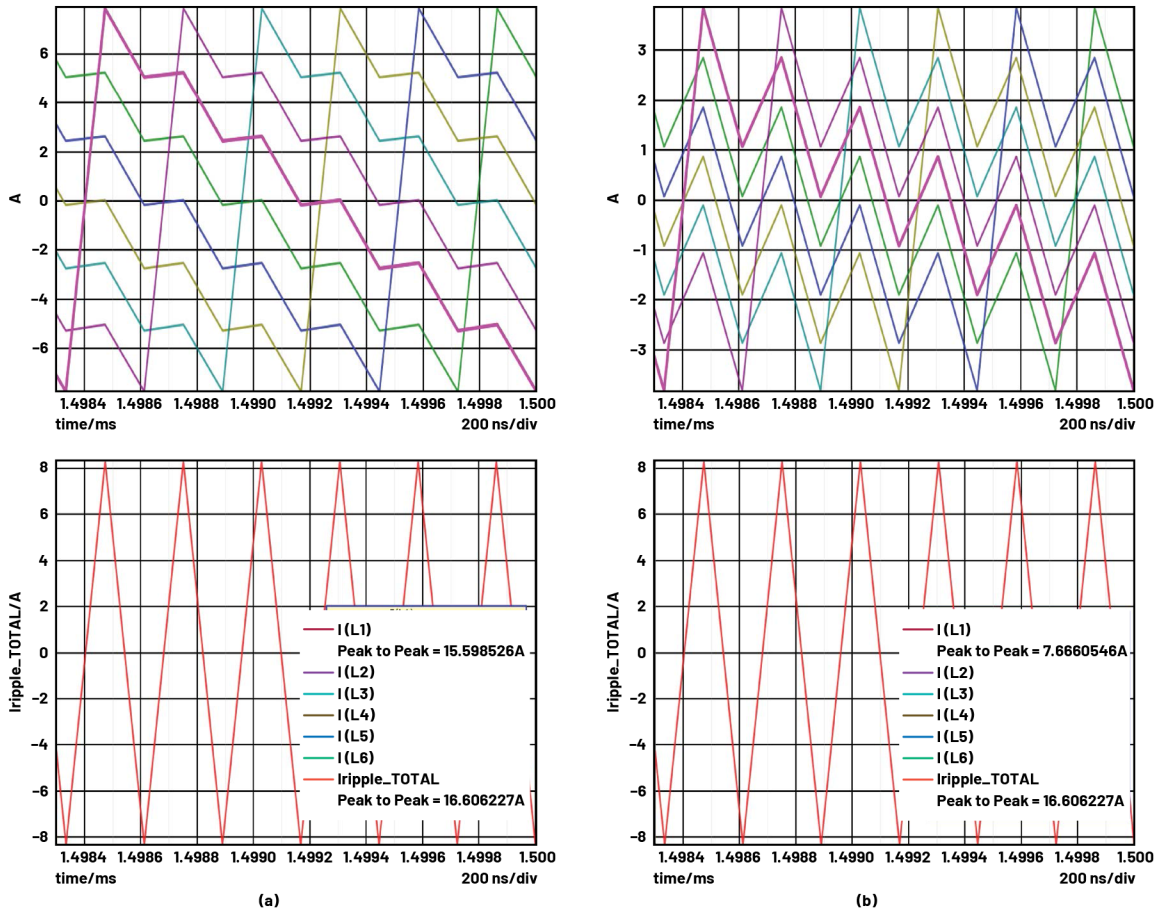


图4. 6相12 V至1.0 V降压转换器的单个电感电流（顶部）和总输出电流（底部红色曲线），其中 $F_s = 600$ kHz: (a) $C_L = 6 \times 50$ nH, $L_m = 50$ nH, (b) $C_L = 6 \times 50$ nH, 且 $L_m = 200$ nH。为了清楚起见，突出显示了第一个相位的电流 $I(L1)$ 。对于任何 L_m 值，输出电流纹波均为相同的16.6 A。

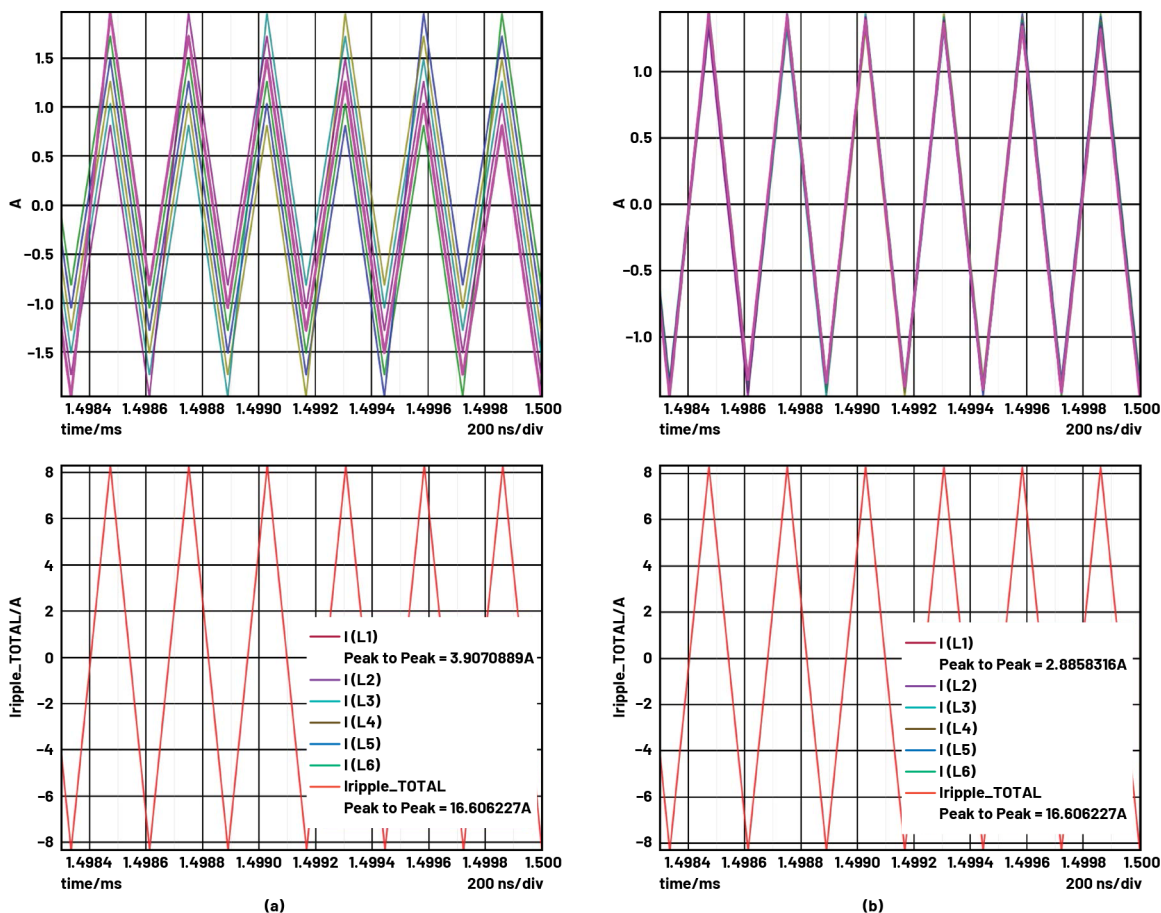


图5. 6相12 V至1.0 V降压转换器的单个电感电流（顶部）和总输出电流（底部红色曲线），其中 $F_s = 600$ kHz，(a) $CL = 6 \times 50$ nH， $L_m = 1$ μ H，(b) $CL = 6 \times 50$ nH，且 $L_m = 10$ μ H。为了清楚起见，突出显示了第一个相位的电流 $I(L1)$ 。对于任何 L_m 值，输出电流纹波均为相同的16.6 A。

在CL中，电流纹波消除所带来的优势显而易见。随着互感的增加，每相的纹波电流急剧减小，直至达到“效益递减”，此时 L_m 的进一步增加会使电流纹波以越来越小的速率降低。设计过大的 L_m 时，例如图5中的1 μ H或10 μ H，也会明显影响CL尺寸，并且很可能影响DCR，因此绘制这些情况只是为了显示电流纹波趋势。

比较DL = 50 nH（图3a）和CL = 6 \times 50 nH与 $L_m = 200$ nH（图4a）之间的相位电流幅度，可发现电流纹波显著减少，减少为约四分之一（从30.63 A降至7.7 A）。不过，请注意，表示所有相位的总输出电流纹波的底部红色曲线对于任何 L_m 值（包括图3a中的 $L_m = 0$ ）都保持不变，即使相位电流波形非常不同。图3至图5中仿真纹波波形的峰峰值幅度与图6中绘制的计算电流纹波(1)、(2)和(6)一致。对于给定的条件 $V_{IN} = 12$ V、 $N_{ph} = 6$ 和 $F_s = 600$ kHz，无论 L_m 值为何，所有六个相位的总输出电流纹波都保持不变，并且当 $V_{OUT} = 1.0$ V时，等于16.6 A。理解这一现象的一种方法是认识到随着 L_m 值的增加，电流纹波会减小，从而导致相位电流变得更加相似。因此，它们的峰值实际上加起来等于输出。可以近似地认为，耦合将相位纹波降低了约 N_{ph} 倍，但随后 N_{ph} 个相似的纹波峰值在输出端相加，从而产生相同的总输出电流纹波。这在图5中尤为明显，其中显示了 L_m 非常大的波形。可以观察到，对于相同的电感值，交错相位的总电流纹波消除保持一致。然而，这种

消除发生的方式是有区别的。如果是DL，主要发生在输出网络中。另一方面，耦合电感的存在允许很大一部分交错和纹波消除向上游传播到每个单独的相位电流中。

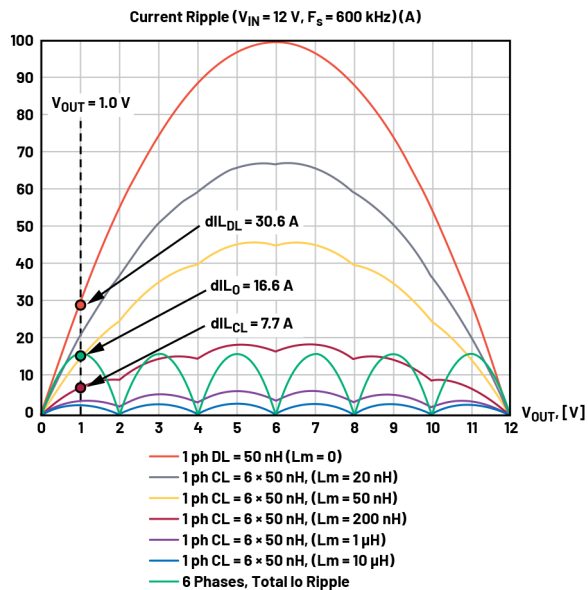


图6. 计算六相 $V_{IN} = 12$ V降压($F_s = 600$ kHz)的电流纹波与 V_{OUT} 的关系，使用50 nH的电感和不同的 L_m 值。总输出电流纹波显示为绿色，所有 L_m 值均相同。

请注意，图6中的所有曲线都对应于相同的最大电流摆率限制（因此也是瞬态的），由每个相位的50 nH电感值定义。

输出电压纹波

对输出电压纹波的简单理解是，假设总输出电流纹波通过输出电容组的有效等效串联电阻(ESR)，导致成正比的压降。该压降表现为转换器输出端的稳态电压波形。更详细的分析需要考虑每个输出电容中的实际电容以及电容寄生和布局寄生。然而，一般预期是输出端的总电流纹波越高，输出电压纹波就越高。这可能会成为CL的限制因素。图3至图5显示了同类条件下的相位电流纹波比较，表明相同电感值具有相同的总输出电流纹波。然而，在实际应用中，图3a所示的30.6 A的DL纹波可能超出每相30 A至50 A负载电流的典型目标范围。在这种情况下， F_s 会更高或DL值会增加。为了利用CL的优势，通常需要在DL和CL设计之间保持相当（且可接受）的相位电流纹波。CL的优势体现在明显更低的 F_s ，可实现更高的效率，或体现在更小的电感值，有利于加快瞬态响应并减小输出电容的尺寸⁸。这意味着，虽然DL和CL之间的相内电流纹波相当，但CL解决方案的总输出电流纹波可能更高。

然而，有几个因素需要考虑。典型的多相解决方案通常将功率级按顺序排列，然后是电感和输出电容。此类布局在使用CL时同样适用。因此， V_{OUT} 网络不是仿真中的单个连接点，而是相位电流以不同距离注入的分布式网络。电容也沿着这一排 V_{OUT} 电感引线分布，并且在它们内部和之间有相关的寄生效应。布局和输出电容中的寄生分布式网络可以更有效、有效地滤除远距离相位的波形。因此，单个电容从附近的 V_{OUT} 电感引脚传导的电流纹波比从较远的引脚传导的电流纹波要多。由于陶瓷电容通常在1 MHz至2 MHz以上具有最小阻抗，因此与每个开关周期具有多个电流峰值的波形（例如，CL；图4b）相比，主 $F_s < 1$ MHz的谐波（DL，图3a）衰减的更少。此外，考虑到输出电容的ESL和ESR产生的极点以及布局寄生，预计具有较高频率内容的波形的衰减也会更大。

另一个因素是，尽管CL的总输出电流纹波在数学上可能大于DL的电流纹波，但局部相位电流相当，实际上CL相位波纹电流的幅度通常会小一些。CL可有效地将输出 V_{OUT} 网络（如果是DL）的电流纹波消除提升到每个开关相位。

图7显示了多相降压转换器的典型组件位置和布局，其中输出电压轨提供给某些CPU或GPU负载（大矩形轮廓所示为插座区域）。输出电容阵列位于指定的负载区域下方。

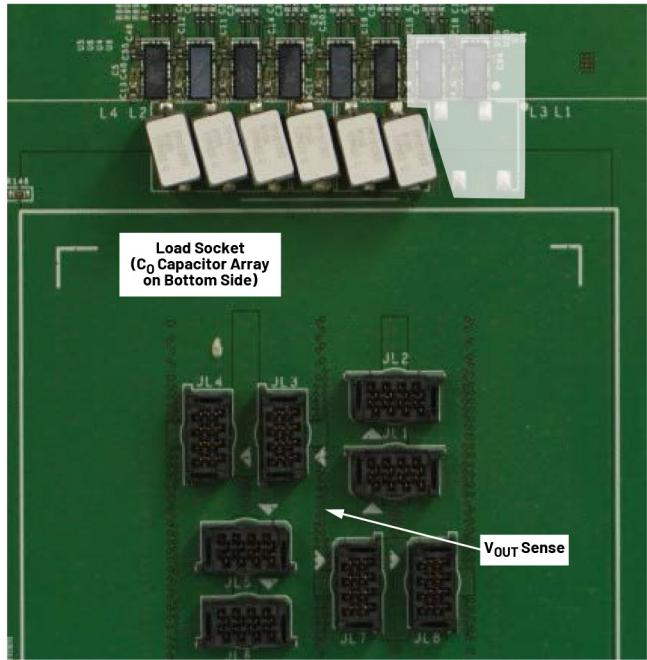


图7. 采用多相降压的电路板布局。六个分立电感有负载。

图8显示了以下条件下图7中负载插座中间电压感应点的 V_{OUT} 电压纹波： $V_{IN} = 12V$ ， $V_{OUT} = 1V$ ， $F_s = 600kHz$ 。最初， $DL = 100$ nH加载到电压调节器的六个相位中，导致最大电压纹波为10.11 mV（图8a）。放置 $CL = 6 \times 100$ nH会导致测量值略有改善，最大为10.05 mV（图8b）。然后，为改善瞬态响应，将 $CL = 6 \times 50$ nH加载到电感位置，结果仅发现纹波略有增加，为14.91 mV（图8c）。这是一个可以忽略不计的增加，特别是考虑到最小输出电容的典型限制因素是快速瞬态条件，而不是 V_{OUT} 纹波。

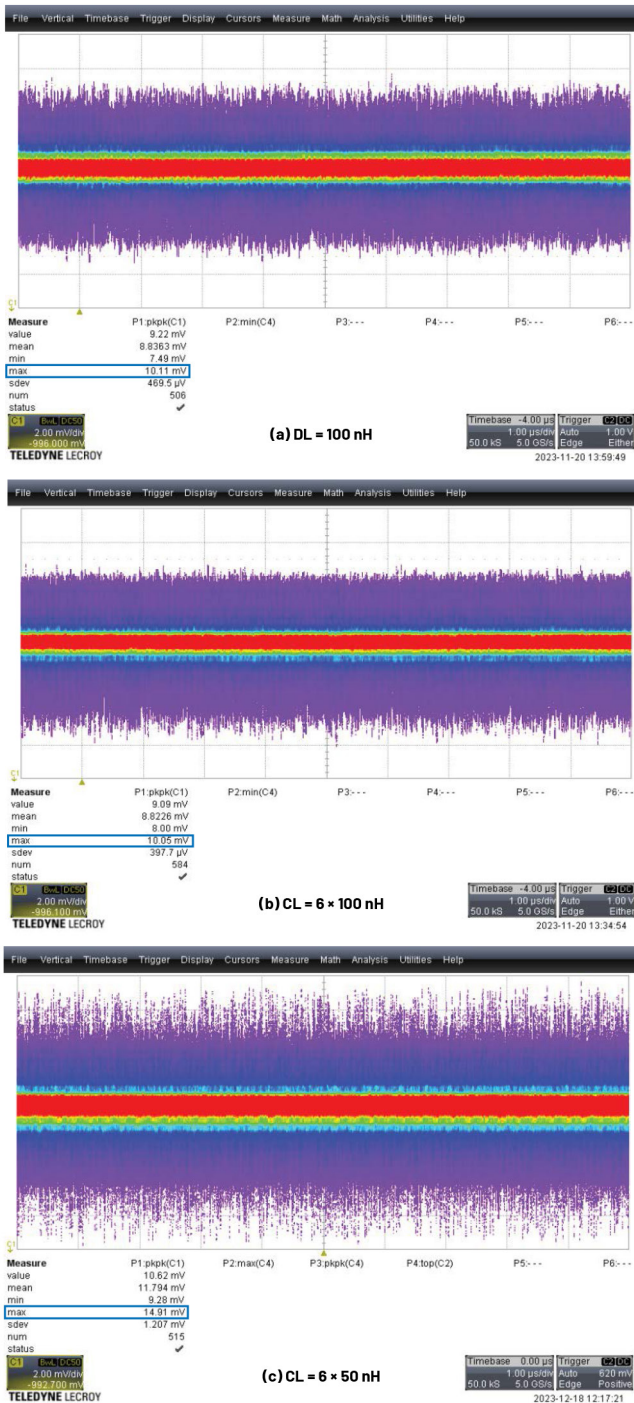


图8. CPU插座中 V_{OUT} 感测端的6相降压（12 V至1 V，600 kHz）的 V_{OUT} 纹波：(a) DL = 100 nH，最大值10.11 mV，(b) CL = 6 × 100 nH，最大值10.05 mV，(c) CL = 6 × 50 nH，最大值14.91 mV。

CL = 6 × 50 nH的相位电流纹波仅为7.7 A，如图4b或图6所示。通过将值增加到DL = 100 nH来降低DL = 50 nH时的30.6 A高电流纹波，会导致按比例减少到15.3 A，这是一种改善（但瞬态响应会受影响）。然而，它仍然是CL = 6 × 50 nH纹波的两倍。因此，选择DL = 100 nH仍会影响效率。

瞬态性能

由于6相CL = 6 × 50 nH在电流纹波方面比具有相似瞬态性能的DL = 50 nH有着很大优势，因此分立电感的值增加到DL = 100 nH，至少一定程度上可以降低与CL = 6 × 50 nH的纹波差异。图9比较了产生的瞬态响应。

测量是在相同的条件下进行的： $V_{IN} = 12\text{ V}$ 、 $V_{OUT} = 1\text{ V}$ 、 $F_s = 600\text{ kHz}$ 。为了展示输出电压的欠冲和过冲，负载线设置更改为较小的压降0.132 mΩ。展示电压过冲的方法比移除一些输出电容的方法更简单。正如预期一样，当 V_{OUT} 较低时（例如， $V_{OUT} < V_{IN}/2$ ），输出电压的峰峰值瞬态性能主要受过冲影响。

对于240 A（每相40 A）的负载阶跃，输出电压峰峰值为 $dV_{OUT} = 81.2\text{ mV}$ （CL = 6 × 50 nH）（图9a）， $dV_{OUT} = 153.3\text{ mV}$ （DL = 100 nH）（图9b）。注意图9中波形顶部的PWM信号：即使反馈回路不是瞬时的，但过冲现象与PWM脉冲的完全缺失相对应。这意味着所有相位都被拉低而没有发生任何开关事件，并且瞬态性能仅受电感本身的电流摆率的限制。因此，CL = 6 × 50 nH和DL = 100 nH之间测得的输出电压峰峰值才有约2倍的差异。

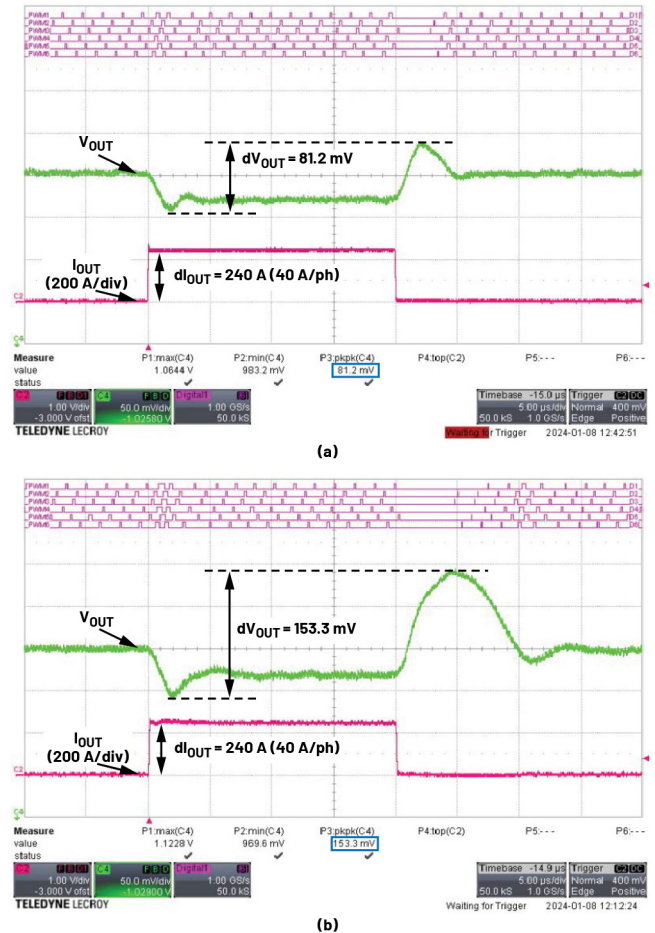


图9. 6相降压转换器的瞬态性能，其中 $V_{IN} = 12\text{ V}$ 、 $V_{OUT} = 1\text{ V}$ 、 $F_s = 600\text{ kHz}$ ，负载阶跃为240 A。(a) CL = 6 × 50 nH，(b) DL = 100 nH。相同的电路板、相同的输出电容和相同的负载线设置降低至0.132 mΩ。

从图9的波形可见， V_{OUT} 纹波不是问题所在，因为剧烈的瞬态摆幅是影响输出电压峰峰值的主要原因。最小输出电容取决于瞬态规范，而不是 V_{OUT} 纹波。

在实际应用中，与 $CL=6\times 50\text{ nH}$ 相比，较慢的 $DL=100\text{ nH}$ 将需要接近2倍的输出电容才能满足相同的 V_{OUT} 峰峰值瞬态规范。同时，如果使用相同的开关频率， $DL=100\text{ nH}$ 仍将具有2倍大的电流纹波。这可能会因两个原因而影响效率：要么是由于较大的电流纹波导致整个电路的电流波形的rms增加以及DL中的交流损耗增加，要么是由于需要更高的开关频率来减少纹波，从而导致开关损耗相应增加。

结论

与传统方法相比，耦合电感技术可实现多种系统优势，并且这些优势可针对许多不同的优先级和应用进行优化⁸⁻¹⁰。然而，一个有趣但违反直觉的事实是，对于具有相同电感值的分立电感和耦合电感，多相降压转换器的总电流纹波是相同的。利用CL的优势时，通常会使总输出电流纹波增加，但会减少每个相位的电流纹波。然而，这种潜在的问题通常可以通过一些方法减轻，例如通过CL有效地将相位交错从转换器输出上游拉到每个相位，以及通过分布式Co槽的滤波特性。换言之，即使是有意增加基于CL的解决方案的总输出电流纹波，与DL相比，它也能更好地分散在不同相位的物理隔离的 V_{OUT} 引线之间。此外，CL的各个相位电流通常具有较高的频率分量和较低的峰峰值，因此它们通常在输出电容和布局寄生的分布式网络中进行更好的滤波。当利用CL优势实现更好的瞬态响应或效率时，这通常会导致 V_{OUT} 纹波略微增加。

在许多多相应用中，输出电容的最小值通常取决于又快又大的瞬态阶跃规范，而不是出于对 V_{OUT} 纹波的考虑。这使得关于总电流纹波的考量变得更加不重要。随着相数(N_{ph})的增加以满足更大的负载电流规范，需要注意一个总体趋势：瞬态阶跃预计会随着 N_{ph} 成比例增长，从而导致所需最小输出电容成比例增加。

作者简介

Alexandr Ikriannikov是ADI公司通信和云电源团队的研究员。他于2000年获得加州理工学院电气工程博士学位，在校期间跟随Slobodan Ćuk博士学习电力电子技术。他开展了多个研究生项目，从AC/DC应用的功率因数校正到适用于火星探测器的15 V至400 V DC/DC转换器。研究生毕业后，他加入Power Ten，重新设计和优化大功率AC/DC电源，然后在2001年加入Vолterra Semiconductor，专注于低压大电流应用和耦合电感器。Vолterra于2013年被Maxim Integrated收购，Maxim Integrated现在是ADI公司的一部分。目前，Alexandr是IEEE的高级会员。他拥有70多项美国专利，还有多项专利正在申请中，并撰写发表了多篇电力电子技术论文。

然而，随着并联交错相位的增加，输出端的总电流纹波显著减小。DL和CL均如此，因此关于输出电压纹波的考量也变得不那么重要。由于CL解决方案通常与更快的瞬态和/或更高的效率相关，因此总输出电流纹波的潜在增加通常不是一个重要的设计因素。然而，在具有缓慢瞬态响应和低 N_{ph} 的应用中，检查 V_{OUT} 纹波性能是一种很好的做法，因为在这类应用中， V_{OUT} 纹波是决定所需最小输出电容的主要因素，而不是瞬态响应。

参考文献

- ¹ Aaron M. Schultz和Charles R. Sullivan。“带耦合感应绕组的电压转换器及相关方法”。美国专利6,362,986，2001年3月。
- ² Jieli Li。“DC-DC转换器中的耦合电感设计”。硕士论文，达特茅斯学院，2001年12月。
- ³ Pit-Leong Wong、Peng Xu、P. Yang和F. C. Lee。“采用耦合电感的交错VRM的性能改进”。《IEEE电源电子会刊》，第16卷第4期，2001年7月。
- ⁴ Yan Dong。“负载点应用中多相耦合电感降压转换器的研究”。博士论文，弗吉尼亚理工学院暨州立大学，2009年7月。
- ⁵ Alexandr Ikriannikov和Di Yao。“解决耦合电感中的铁损问题”。Electronic Design News，2016年12月。
- ⁶ “耦合电感的基础知识和优势”。ADI公司，2022年10月。
- ⁷ Alexandr Ikriannikov。“多相DC-DC应用中磁元件的演变和比较”。IEEE应用电源电子会议，2023年3月。
- ⁸ Alexandr Ikriannikov和Di Yao。“采用多相磁元件的转换器：TLVR与CL和新型优化结构之比较”。PCIM Europe，2023年5月。
- ⁹ Alexandr Ikriannikov和Brad Xiao。“带电感的多相转换器的广义FOM”。IEEE ECCE 2023，2023年10月。
- ¹⁰ Brett Miwa。“高密度电源的交错转换技术”。博士论文，麻省理工学院，1992年5月。
- ¹¹ Tim Hegarty。“多相降压转换器的优点”。EE Times，2007年11月。

技术文章

一步转换为内核电压

Frederik Dostal, 电源管理主题专家

摘要

本文介绍了将高电压（如48 V或54 V）直接一步转换为内核电压（通常低于1 V）的可能性。这种转换方式不仅能节省空间、提升效率，还能降低与设计输入电源轨相关的成本。与使用12 V中间总线相比，承载相同功率时，布设高压总线所消耗的铜更少。

数据中心数字处理器、高端FPGA、更大型的人工智能(AI)处理器和超级计算机有何共同点？答案是它们都需要电源来提供内核电压。内核电压通常低于1 V，电流水平从100 A以下到1 kA及以上不等。

构建大电流、低电压电源难度很大。为了尽可能减少散热要求，高转换效率至关重要。此外，电压转换器必须设计紧凑，以尽可能减小电源电路和负载（处理器）之间的寄生走线效应，从而有利于快速响应负载瞬变并更好地调节电压。

图1为一种常见的电压转换器架构，首先将48 V电源电压转换为12 V直流链路电压，然后在第二步将其调节到低于1 V的内核电压。

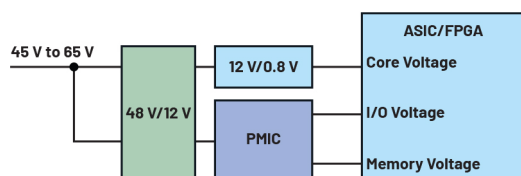


图1. 分两步从48 V转换为0.8 V内核电压的电压转换架构

尽管每一步的效率都很高，但两步转换的总体效率却较低。由于累积损失，即使每个转换步骤的效率达到93%，总效率也只有大约87% ($0.93 \times 0.93 = 0.8649$)。

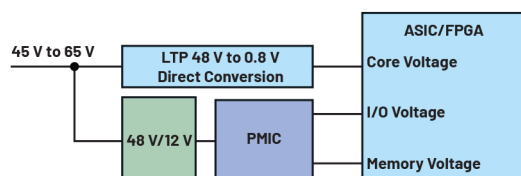


图2. 一步将48 V转换为0.8 V内核电压的电压转换架构

图2为另一种转换架构，它采用µModule® LTP8800-4A，能够通过一个步骤直接将48 V电压转换为0.8 V的内核电压。当负载电流为100 A时，该解决方案的效率可达90%以上。而且，该模块可提供最高200 A的输出电流。多个此类器件可以并联工作，产生1000 A或更大的电流——这对于某些高端处理器至关重要。

专用内核电压转换器，例如LTP8800-4A，可以在电流高达200 A时，一步产生0.5 V至1.1 V的内核电压。常规降压转换器电路难以应对极低的占空比。从48 V转换为0.5 V时，占空比通常仅有1%左右，这给电路设计带来了很大的挑战。由于开关稳压器的固有约束（如最短导通时间），在较高开关频率下难以实现如此低的脉冲宽度比（占空比），从而导致效率难以达到理想水平。

免去直流链路电压可简化系统配置，电路只需要一个电源转换器级便可完成转换。这种方法不仅节省了空间，而且因为48 V或54 V的高电源电压被直接送入内核电压转换器，这还减少了铜需求，从而优化了成本。

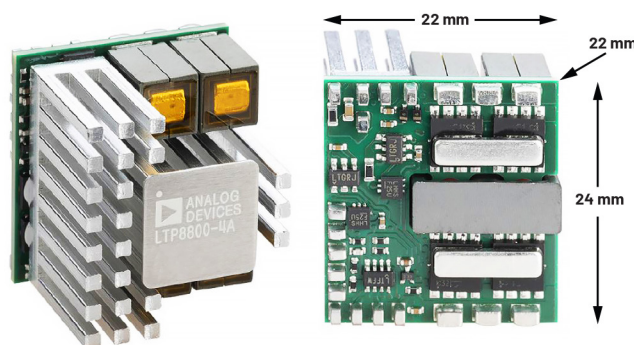


图3. 尺寸小巧，采用LTP8800-4A模块

图3展示了采用LTP8800-4A模块的小尺寸解决方案。利用 μ Module器件可以获得出色的电源，并避免传统电路设计的复杂性。最终生成的电路结构紧凑，易于集成到邻近数字负载的电路板上。

现代内核电压转换器（例如前面提到的 μ Module器件）通过PMbus[®]连接提供先进的数字控制功能，便于实时监控电压、电流、温度和故障。内部EEPROM可以存储各种设置和错误日志。此外，数字连接支持对电源转换器的控制环路进行微调。

结论

新模块可将48 V电压直接转换为内核电压，从而提供结构紧凑且效率出色的电源架构选项。

作者简介

Frederik Dostal是一名拥有20多年行业经验的电源管理专家。他曾就读于德国埃尔兰根大学微电子学专业，并于2001年加入National Semiconductor公司，担任现场应用工程师，帮助客户在项目中实施电源管理解决方案，进而积累了不少经验。在此期间，他还在美国亚利桑那州凤凰城工作了4年，担任应用工程师，负责开关模式电源产品。他于2009年加入ADI公司，先后担任多个产品线和欧洲技术支持职位，具备广泛的设计和应用知识，目前担任电源管理专家。Frederik在ADI的德国慕尼黑分公司工作。

模拟对话

48 V技术的魅力： 系统级应用中的重要性、 优势与关键要素

Christian Cruz, 应用开发工程师

摘要

技术世界千变万化，人们对高效可靠电源解决方案的需求持续上升。近年来，48 V电源电压备受关注。乍看之下，48 V可能并不新颖，但它具有众多优势，非常实用，并且已成为各种系统级、工业、汽车和通信应用中的重要组成部分。本文将通过实际例子和演示探讨48 V电源电压的优势。

简介

48 V电源电压用途广泛且与现有基础设施兼容，因此在各种应用中发挥着关键作用。以前，配电系统严重依赖标准12 V或24 V电平。然而，现代设备和电子产品的功率需求不断增加，对系统效率和能源经济性要求也逐渐提高，因此，48 V等更高电源电压逐渐受到青睐。

数据中心汇集了超级计算机等高算力设备，非常需要节能解决方案。48 V电源电压在传输效率和转换损耗之间取得了平衡，是一种比较出色的折衷方案。提高电压可以减少配电损耗，降低总体能耗。

48 V电源电压也有利于汽车行业，尤其是电动汽车(EV)。电动汽车的先进功能和电驱动力系统日渐增加，人们也越来越需要更节能的解决方案。48 V架构改善了再生制动期间的能量回收，并更易于集成电子转向助力和高级驾驶员辅助系统等大功率组件。

48 V电源电压的优势

采用48 V电源电压，不仅能提升系统效率，还能为设计提供更灵活的选择。以下是一些主要优势：

- ▶ I²R损耗更低
 - 配电系统中的电阻损耗(I²R损耗)会对效率产生重大影响。与较低电压系统相比，功率水平一定时，48 V电源电压系统的电流更低。因此，传输过程中的I²R损耗更低，整体系统效率更高。
- ▶ 功率密度更高
 - 与较低电压系统相比，48 V电源电压支持使用更小的导线和元件来传输同一功率。这相当于提高了功率密度，因此可以让设计更加紧凑，特别适合空间有限的应用。
- ▶ 增强电压调节能力
 - 根据定义，电压电平越高，电压调节能力越强，这对于波动敏感型应用非常关键。为了保持可靠运行，工业自动化和通信系统通常需要稳定且经过良好调节的电压电平。
- ▶ 设计灵活性
 - 48 V电源电压支持更多设计选择。支持集成电压需求各不相同的众多子系统。电机、传感器和通信接口都可以在同一个系统中共存。
- ▶ 与可再生能源兼容
 - 48 V电源电压与可再生能源系统（如太阳能装置）中太阳能电池板的电压输出完美匹配。这种互操作性使得我们可以轻松将可再生能源纳入现有电力系统。

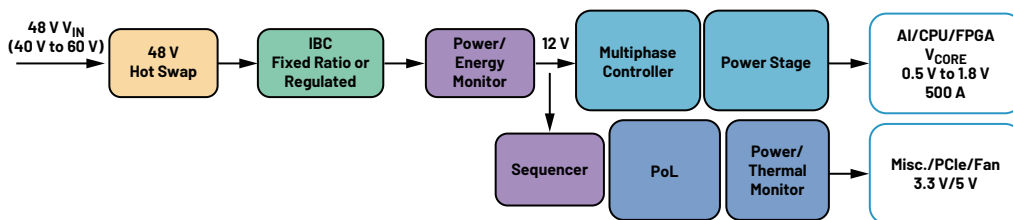


图1. 系统内的高效电压转换¹

48 V电源电压实施要点

实施过程中必须充分考量注意事项，才能充分利用48 V电源电压的优势。让我们从系统级、工业和通信应用的角度来了解这些基础知识。

高效电压转换

虽然48 V越来越受欢迎，但并非所有设备和组件都能直接处理该电压电平，而是需采用高效的电压转换方法（如DC-DC转换器）来降低电压，以满足子系统对更低电源电压的需求。参见图1。

热管理

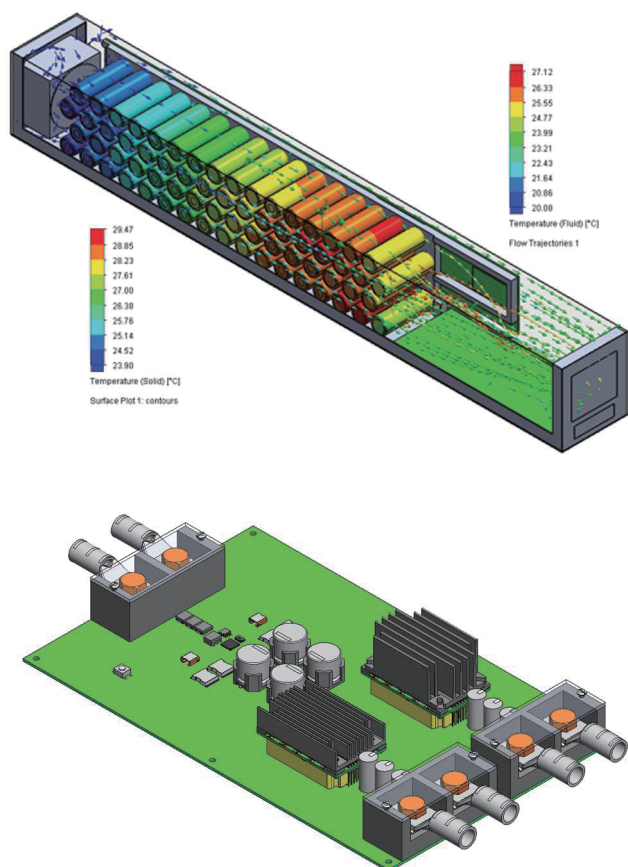


图2. ADI-BBU模块²和四分之一砖块参考设计

图2备用电池单元(BBU)模块中的较高电压电平和四分之一砖块参考设计方法可能会产生较大的热量。散热器、风扇和热设计考虑等热管理方法对于确保48 V组件的寿命和可靠性至为关键。

安全措施

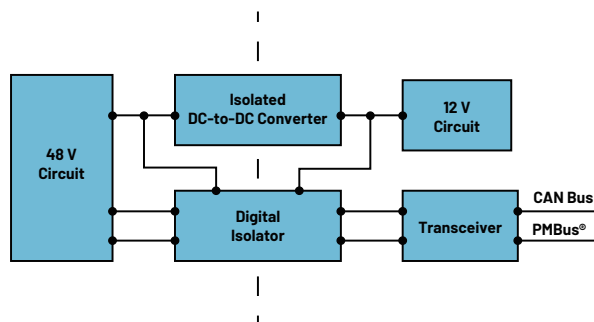


图3. 轻度混合动力电动汽车中48 V与12 V之间的电气隔离³

安全是所有电气系统的重中之重。虽然48 V电源电压不是特别高，但也必须配备足够的安全预防措施，例如电路保护、隔离栅和接地，以避免与电气故障相关的风险。48 V和12 V系统应用就使用了隔离栅来实现电气隔离，如图3所示。BBU模块Modbus®通信方法借助ADM2561E在BBU模块与BBU架之间建立隔离通信。

通信协议

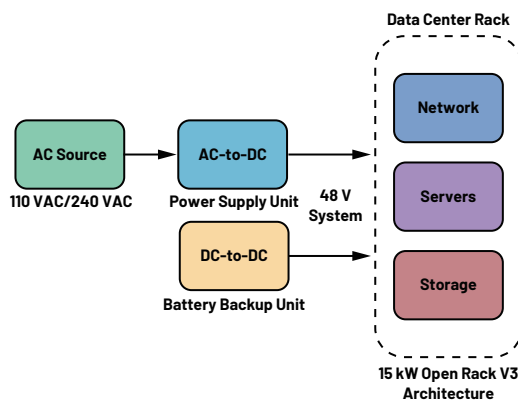


图4. 开放计算项目Open Rack V3架构⁴

在现代工业和通信应用中，互操作性至关重要。实施标准化的通信协议可确保在48 V运行的子系统之间实现无缝的数据交换，从而提高整个系统的效率。开放计算项目(OCPI)正在引领新的数据中心架构的持续采用。该组织为48 V系统的电力整流器、BBU（电池备份单元）、网络、存储和服务器提供了完整的架构设计。请参见图4。

监测与控制

为使系统始终保持出色性能，需要持续实时监测电压电平、电流和温度。可以采用智能控制系统来主动管理这些要素。通过无缝协调实时调整，这些系统不仅可以预测故障，还能为预防性诊断铺平道路，将系统效率和可靠性提升到更高水平。

实际应用

48 V电源电压已应用到众多领域和技术中。下文的一些实际例子将带您理解其重要意义：

电信电源系统

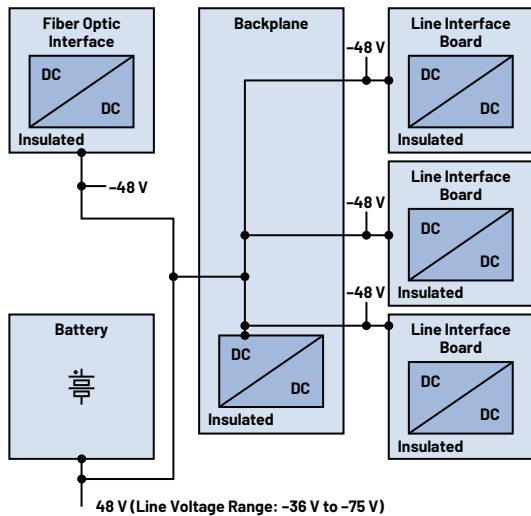


图5. 电信—48 V配电系统⁵

电信网络是现代社会的基石，而电信网络的稳定运行离不开持续可靠的电力供应。48 V架构作为可靠性和效率的基础，正逐渐崭露头角，改变电信电源系统的格局。参见图5。这些系统负责提供全球通信，其电力基础设施必须要能够承受地区差异和停电意外。

然而，48 V架构的真正优势在于可以克服地理限制。在偏远的内陆地区和受灾地区，传统电力基础设施可能缺失或老化，但48 V架构不会受到影响。即使环境条件较为苛刻，它也能可靠地提供电力，成为通信服务的有力保障。该架构固有的耐久性确保孤立无援的群众能在需要帮助时保持联系，在紧急情况下保障关键通信，并通过超强连接能力促进农村发展。

工业自动化中的电力驱动

在工业自动化领域，精度和效率至关重要。48 V电源电压在这种动态环境中大放异彩，可以为电动机、传送带机械臂等各种关键部件提供动力。该电压电平是功率密度和控制的基础，不仅能协调系统稳定运行，还能减少能量损失，并进一步提高工业自动化水平。

混合电力系统

混合电力系统为难以接入传统电网的农村和无电网地区带来了新的能源使用方式。这些先进系统将可再生能源（主要是太阳能电池板）与现代储能设施无缝结合，提供可靠且可持续的能源解决方案。在本例中，48 V电源电压与太阳能输出的兼容性，对于有效弥补太阳能电池板能量与各种应用需求之间的差距具有重要影响。

48 V电源电压与太阳能电池板产生的电压范围完全一致，有助于实现高效的能量转换和分配。这种兼容性消除了高压转换的需要，而高压转换是能源损失、效率低下和成本增加的主要原因。48 V架构通过与太阳能输出准确匹配来尽可能提高能量收集效率，太阳能产生的电力可以直接进入系统，损失很小。

此外，48 V电源电压和太阳能输出的一致性使混合电力系统安装具有良好的成本效益。简化的电压转换过程无需复杂且昂贵的器件，安装和维护成本更低。这种可以降低成本的做法，对于那些远离电网的社区和企业来说是一次意义重大的变革，不仅让可再生能源触手可及，还带来了更加经济的解决方案。

电动汽车

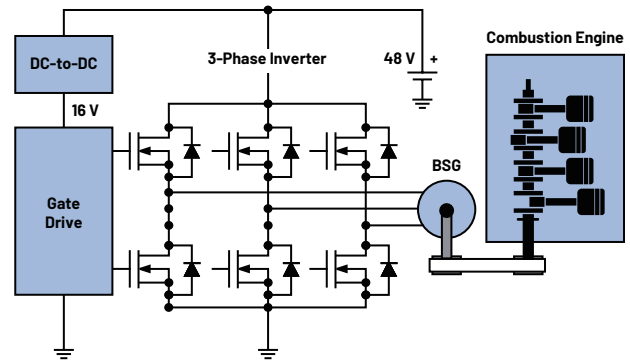


图6. 48 V轻度混合动力电动汽车⁶

48 V设计在电动汽车中的应用（如图6所示）是一个战略性步骤，带来了诸多益处。这种电压范式对于改善全车子系统的电源分配非常重要。除了在电源分配中的作用外，48 V架构还提

供一系列新功能，例如再生制动，即在制动过程中回收能量。此外还支持集成有助于提高乘客舒适度的辅助系统，包括高级HVAC（供暖、通风和空调）系统和先进多媒体设备。48 V架构使得这种全面的电动汽车设计成为可能，不仅提升了能源经济性，而且通过优化功率使用、资源管理和车内便利设施，改善了整体驾驶体验。

虽然48 V电源电压可以为系统级应用带来不少优势，但我们也必须正视这种系统可能存在的一些缺点。

需要考虑的缺点：

组件兼容性和可用性

切换到48 V电源电压需要仔细评估现有系统组件，进而某些组件可能需要更换或调整。然而，一个潜在问题是，能兼容指定额定电压的组件不多。这可能导致采购价格上涨，系统顺利整合的时间也可能延后。因此，制定正确的战略规划和采购方案很重要。参见图7。

设计复杂度

48 V电源电压往往会导致在一个时期内增加设计复杂度。实施阶段通常需要谨慎处理复杂的设计问题，例如准确的电压调节、完善的热管理策略和稳健的安全标准。复杂性提高可能会延长开发周期，并增加对具体技术技能的需求。因此，企业需要组建一支经验丰富、能力出众的设计团队，以便高效应对这些复杂的挑战。

电压相关风险更高

虽然48 V并不是特别高，但也仍然可能带来安全问题，尤其是在没有充分实施基本安全预防措施的情况下。电压电平升高可能会提升触电风险和其他危险，因此必须采取严格的安全预防措施。

转换损耗增加

当需要转换电压以便为需要较低电压电平的组件（如传感器或低功耗设备）供电时，额外的转换步骤可能会导致提高系统中的能量损失。这会抵消48 V电源电压的一些能效提升优势。

传统系统采用有限

对于针对较低电压电平的传统系统，切换到48 V电源电压需要进行仔细评估。后续的调整工作可能会面临一些障碍，使其既不切实际，又成本过高。改造现有基础设施以顺利支持48 V标准可能是一项复杂且耗时的任务，需要进行重大调整和战略规划，以确保兼容性和出色性能。

尺寸和空间限制

虽然48 V设备的电流水平较低，可支持更高的功率密度，但可能不适合对尺寸和空间有严格要求的应用。额外的绝缘和安全预防措施要求可能导致组件尺寸加大。参见图8。

电磁干扰(EMI)增加

电压电平升高会增加电磁干扰(EMI)，进而还会导致严重问题。电磁干扰会让精密组件和复杂通信网络无法平稳运行。因此，有必要额外采用屏蔽技术和高标准滤波技术，以有效抵消和减轻EMI的负面影响，确保关键系统持续可靠运行。

可扩展性挑战

虽然48 V对于许多应用来说都是合理的选择，但某些情况可能会有更优选。某些应用，特别是功率水平更高的应用，可能需要使用其他电压设计来满足特定需求。

成本考虑

采用48 V电源电压需要仔细考虑前期成本，包括更换组件、协调系统开发以及实施关键安全措施等的成本。这些初始费用可能会对整个项目预算产生显著影响，具体影响取决于实际应用和所处的行业。面对这些潜在的费用，明智地分配资源对于能否顺利整合和实现成功至关重要。

结论

48 V电源电压不再是小众选择，而且已经成为了系统级、工业和通信应用的关键组成部分，可以满足人们日益增长的节能解决方案需求，并兼具效率更高、功率密度更高和设计灵活性更大等优势。然而，48 V应用的成功离不开高效的电源转换、严格的热

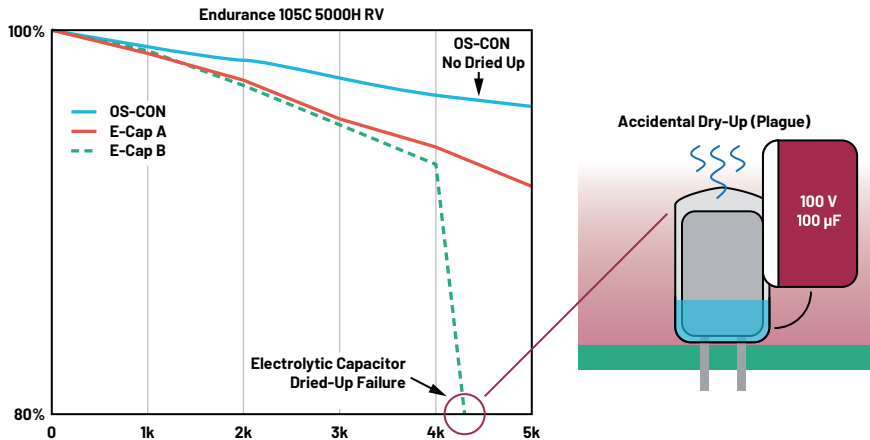


图7. 电解液干涸造成电解电容器电容降低⁷

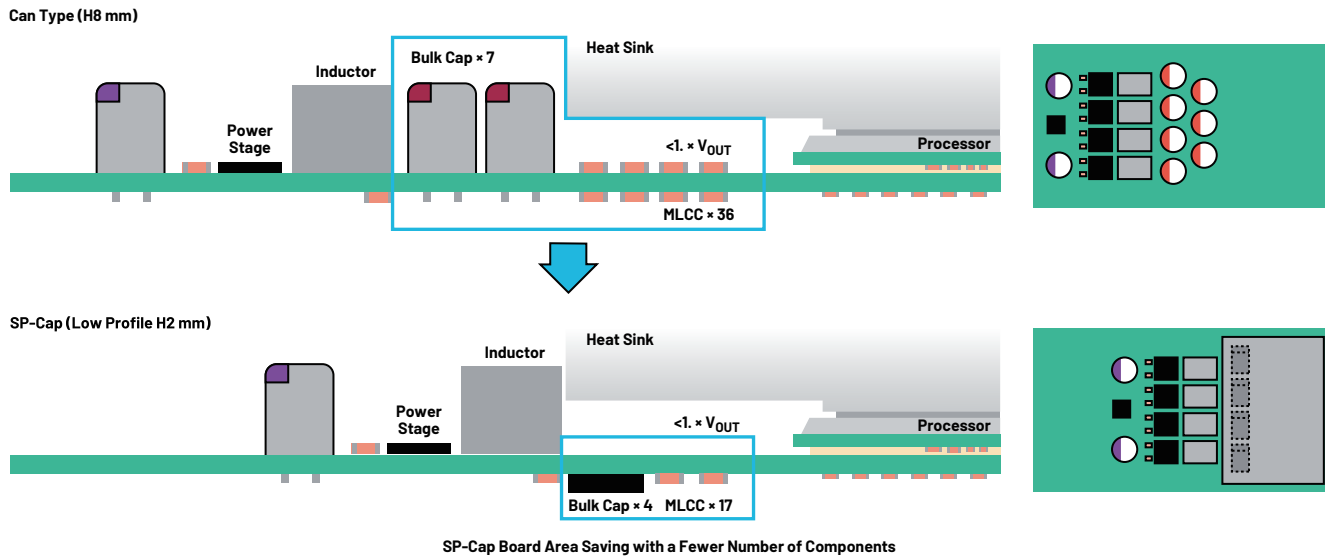


图8. 电容器输出侧电路安装注意事项³

管理、稳健的安全预防措施、标准化的通信协议以及复杂的监测和控制系统。随着技术环境的演变，48 V电源电压仍是多个领域的关键创新推动因素，未来将继续提供高效可靠的动力。

此外，在系统级应用中，48 V电源电压能带来显著优势，值得设计人员或应用工程师深入研究。然而，我们也必须全面权衡，充分认识到这种选择可能带来的潜在弊端。针对特定应用，为了明智地使用电压电平，应综合考虑组件兼容性、设计复杂度、安全预防措施、能量转换损耗和相关成本。

参考资料

¹ Brad Xiao和Nazzareno "Reno" Rossetti, “处理48 V至12 V降压”, 《Power Electronics Tips》(电源提示), 2021年2月。

² ChristianCruz、GarySapia和MarvinNeilCabueñas, “实现不间断能源的智能备用电池第一部分: 电气和机械设计”, 《模拟对话》, 第57卷第4期, 2023年12月。

³ Anant Kamath, “简化HEV 48 V系统的隔离CAN电源接口”, 《Electronic Design》(电子设计), 2019年4月。

⁴ GlennCharest、SteveMills和LorenVorreiter, “OpenRackV3基本规范”, 开放计算项目, 2022年9月。

⁵ “电信系统电源”, ADI公司, 2002年7月。

⁶ “48 V降压转换器助力MHEV满足燃料排放标准”, ADI公司, 2020年3月。

⁷ “它对于数据中心而言是否必不可少? 需要48 V电源的原因以及相关电源设计挑战”, Panasonic Industry, 2021年8月。

作者简介

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

模拟对话

实现不间断能源的 智能备用电池第一部分： 电气和机械设计

Christian Cruz, 应用开发工程师

Gary Sapia, 系统应用总监

Marvin Neil Cabuenas, 高级固件工程师

摘要

本文概要介绍了开放计算项目开放机架第3版(OCP ORV3)备用电池单元(BBU)的系统要求。文中强调了可在停电时提供电能的高效、智能BBU的重要性。此外, 本文展示了模拟和数字设计解决方案、电气和机械解决方案及其为满足书面规范而开发的架构。

引言

数据中心为互联网提供支持, 连接世界各地的社区。Facebook、Instagram和X (前称Twitter) 等社交媒体公司依靠数据中心来传播和存储信息, 而雅虎和谷歌等搜索引擎则利用数据中心支持其主要搜索引擎和存储功能。全球几乎所有大公司和政府机构都需要可靠的数据中心功能, 以通过智能计算、存储和搜索来运营和维护其主要业务职能。随着用户数量逐年增加, 数据中心容量持续以惊人的速度增长, 以适应需求和技术进步。为了跟上不断增长的需求, 数据中心的系统架构也要不断更新升级。

OCP是一个共享数据中心设计的组织, 其系统架构定义基于开放计算项目开放机架第2版(OCP ORV2), 其中背板电压标称值为12 V, 系统功率为3 kW。另一方面, 使用量的增加导致功率需求增加, 这使得12 V系统的功率要求过高, 进而不利于整体系统性能。为了解决这个问题, 在系统功率保持不变的情况下, 背板电压增加到48 V, 从而尽量减少所需的电流和铜走线, 并降低背板散发的热量。这一变化提高了整体系统效率, 并降低了对复杂散热系统的需求。这就是新的开放机架第3版标准(OCP ORV3)的基础。

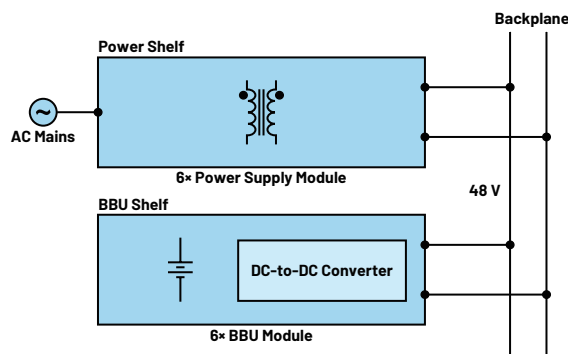


图1. OCP ORV3电源架构。

数据中心的可靠性是保证运营正常的基本条件。为系统增加BBU可提供系统冗余性。如果发生停电或限电, 系统需要时间来察觉情况, 保存重要数据, 并将操作切换到另一台数据中心服务器 (很可能位于不同的数据中心设施和地点)。这些应对操作必须以无缝的方式完成。每个机架都使用备用电源系统来调节系统的延时电源。这一需求在最新标准ORV3 BBU中被明确为: 基于锂离子电池储存和调节的电量, 每个BBU单元需提供15 kW功率输出, 维持系统运行4分钟。

在该规范的指导下，ADI公司与OCP组织合作完成和制作了参考设计方案，它包括：用于通过单一电路专门进行充电和放电操作的双向电源转换器、电池管理系统(BMS)器件、带固件和GUI支持的板载设计系统主机微控制器以及硬件放大。

设计要求和硬件实现

OCP组织提供的规范（第1.3版）中概述了满足BBU模块标准所需达到的构思和设计的要求。BBU模块参考设计基于ORV3 48 V提案，由带BMS的电池包、充电/放电电路和其他功能块组成，如图2所示。

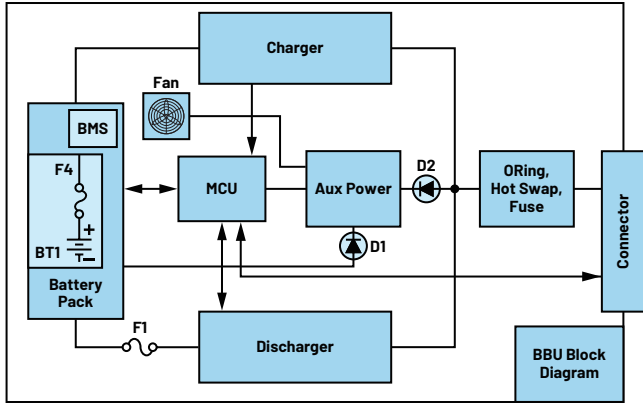


图2. OCP ORV3 BBU框图。

除了电路要求外，BBU模块在其使用寿命期间还需要有几种主要工作模式，具体如下：

- ▶ 休眠模式：BBU模块处于运输或库存状态，或者未连接到有源母线。此时电池放电电流最小，以延长储存时间。BBU监控或报告功能在休眠模式下不可用。当检测到母线电压高于46 V且持续时间大于100 ms而小于200 ms，并且PSKILL信号为低电平时，BBU将唤醒并退出休眠模式。
- ▶ 待机模式：BBU模块已充满电且运行正常，并持续监控母线电压，以便为放电事件做好准备。BBU模块在其使用寿命的大部分时间都以这种模式运行。BBU模块的状态和参数通过通信总线显示在上游机架监视器上。
- ▶ 放电模式：当母线电压降至48.5 V以下且持续时间大于2 ms时，BBU模块放电模式就会激活。BBU模块预计将在2 ms内接管母线电压，备用时间为4分钟。
- ▶ 充电模式：当所有条件都满足时，BBU模块使其内部充电器电路，为其电池包充电。根据电池容量的上次放电深度，充电电流可以为0 A至5.5 A之间的任意值。它还允许上游系统通过通信总线超控充电电流。应该有一个基于计算的充电电流的充电器超时控制方案。

- ▶ 运行状态检查(SOH)模式：BBU模块通过对电池包进行强制放电来例行测试电池包容量。BBU模块应每90天执行一次SOH测试，以确定电池的EOL状态。
- ▶ 系统控制模式：BBU应允许上游系统通过通信总线控制充电/放电操作。

除了BBU模块运行要求外，OCP还规定了电池包容量、电芯类型和电池包配置的标准。具体说明如下：

- ▶ 电池包容量：BBU模块可以在4年时间里提供不超过4分钟的3 kW备用电源。
- ▶ 电芯类型：BBU模块应为锂离子18650型，电芯电压为3.5 V至4.2 V，电池容量至少为1.5 AH，连续额定放电电流为30 A。
- ▶ 电池包配置：BBU模块的电池包配置为11S6P（6个串联组合并联在一起，每个串联组合由11个电芯串联而成）。

此外，BBU模块需要有BMS来提供电池充电/放电算法、保护、控制信号和通信接口。BMS还负责建立电芯平衡电路，使电池包中的电芯电压保持在 $\pm 1\%$ (0.1 V)容差以内。

参考设计框图（见图3）显示了选定的器件，以及为完成某些任务而集成的各种元件，它们构成的电路能够提供不间断电源、判断模块运行状况和故障并执行模块通信。[LT8228](#)是一款双向同步控制器，位于BBU模块内。该器件在线路电源中断的情况下提供电源转换，并在非故障运行期间提供电池充电功能。[LT8551](#)是一款4相同步升压DC-DC相位扩展器，与LT8228协同工作，将放电功率输送能力提高至每个BBU模块3 kW。除了电源转换IC外，BBU模块还包含[MAX32690](#)，它是一款超低功耗Arm®微控制器，负责整个系统的运行。[LTC2971](#)是一款2通道电源系统管理器，用于实现电源路径的精密感知和故障检测，以及关键的电压下降功能。[MAX31760](#)是一款精密风扇转速控制器，用于在充电和放电操作期间执行系统散热功能。EEPROM用作数据存储设备，允许用户在BBU模块可用期间恢复任何有用数据。除了电源转换器和负责一般管理任务的微控制器之外，设计中还包含BMS IC。[ADBMS6948](#)是一款16通道多电芯电池监控器，用于监测电池电压水平，而其固有的库仑计数器用于确定充电状态(SOC)和SOH水平，以进行电池平衡和电池预期寿命计算。电池运行状态监控程序由超低功耗Arm微控制器[MAX32625](#)完成。两款微控制器均经过精心挑选，以降低总功耗，从而延长BBU休眠工作模式期间的电池寿命。

除了所提供的器件之外，该参考模块还提供和构建了BBU模块（见图4a）和BBU层板（见图5），以容纳和展示符合OCP ORV3 BBU模块和层板机械规范的参考设计。BBU层板包括6个BBU模块插槽，因此单个BBU层板可根据需要提供高达18 kW的备用电源。

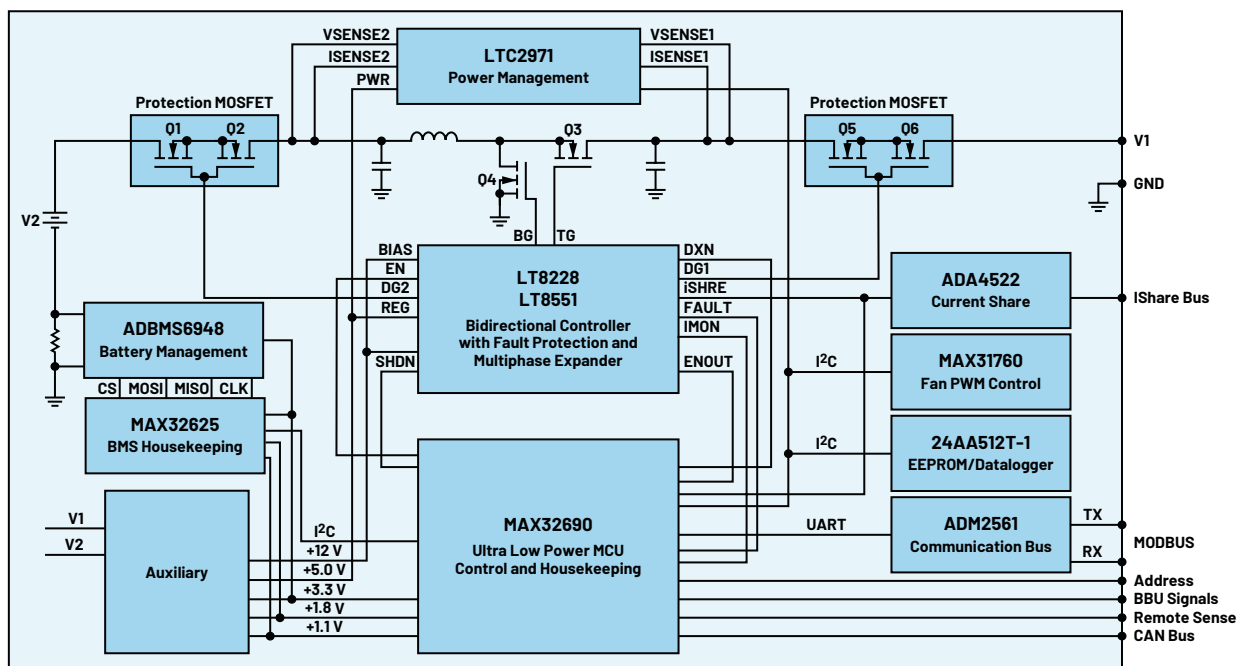
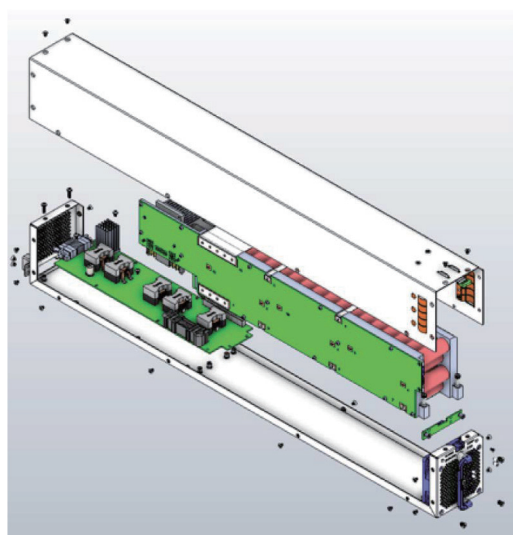
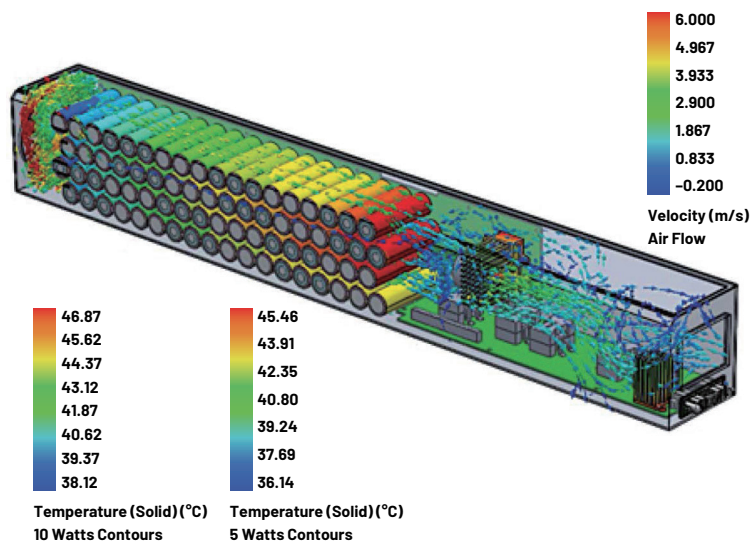


图3. ADI OCP ORV3 BBU框图。



(a)



(b)

图4. (a) ADI BBU模块的3D渲染机械概览, (b) 气流仿真。

机械渲染和气流仿真是BBU模块参考设计在架构上的两个优势。首先，它支持可视化，可提供准确且有吸引力的表示形式。机械结构分析可尽早发现设计问题和潜在变化，这有助于整个设计过程。最后但同样重要的是，它可以减少对耗时又昂贵的实际原型的需求。另外，气流仿真可以提供性能分析，帮助识别潜在问题并提高设计效率。它还负责热管理，能够协助识别热点，优化热损失，并增强整体系统可靠性。此外，它还能够根据安全和合规的要求规划电池包空间，从而降低风险。更多信息请参见图4b。

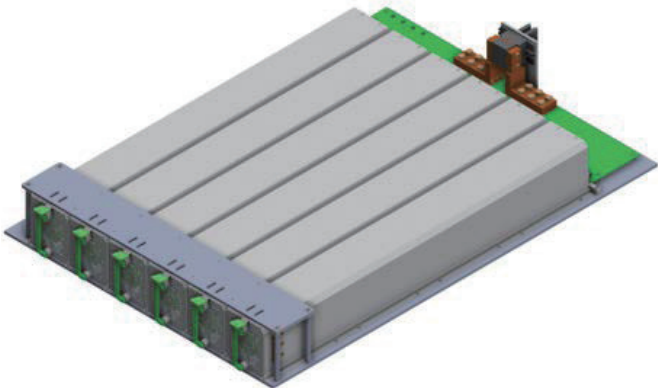


图5. 已插入六个BBU模块的ADI BBU层板的3D渲染。

数据与结果

下面给出的测试结果包括稳态性能测量、功能性能波形、温度测量和工作模式转换。使用BBU模块参考设计测试了以下配置：

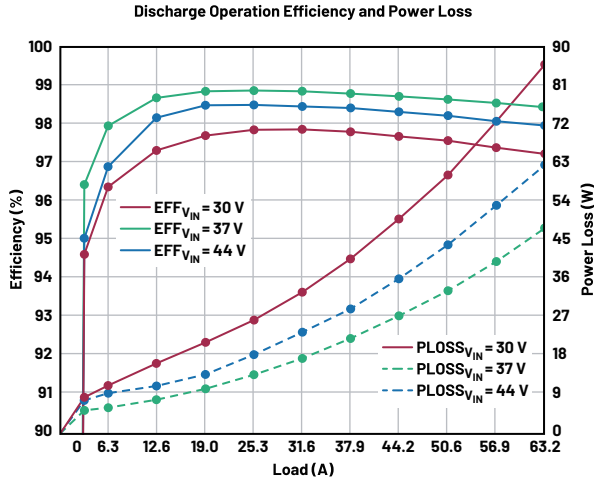


图6. 放电和充电工作模式期间各自的效率和功率损耗。

表1. ORV3 BBU模块参数

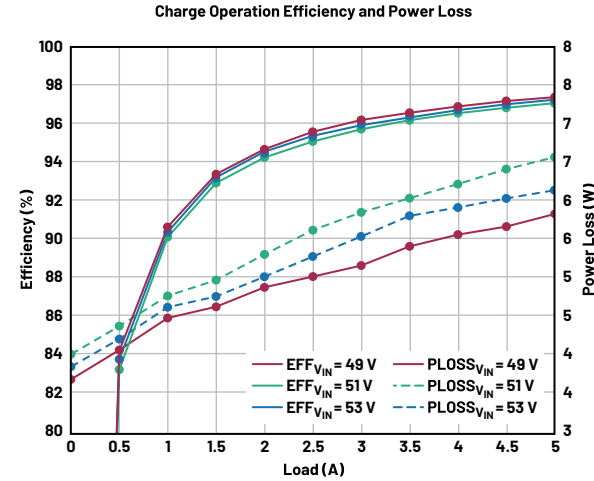
放电操作（升压模式）	充电操作（降压模式）
输入电压：30 V至44 V	输入电压：49 V至53 V
输出电压：47.5 V至48 V	输出电压：48 V
输出负载：0 A至63.2 A	输出负载：0 A至5 A
开关频率：150 kHz	开关频率：400 kHz

性能数据

效率与功率损耗

BBU模块参考设计证明了它能够在满足ORV3 BBU规范的约束条件下，实现更高的效率和更低的功率损耗。放电和充电限制分别设置为97%和95%。在放电操作期间，测得的半负载(31.6 A)平均效率为98.5%，而满负载(63.2 A)平均效率为98%。受更大电感的影响，较低MOSFET漏源导通电阻和精心选择的开关频率将有助于提高效率 and 降低纹波电流。此外，BBU模块在5 A负载的充电操作期间实现了97%的高平均效率。在使用相同电感值的情况下以400 kHz开关频率运行时，效率得到提高，功率损耗也充分降低。高效率和较低功率损耗将有助于延长电池寿命周期，并降低散热所需的风扇转速。参见图6。

另一方面，控制和同步MOSFET的传导损耗会影响BBU放电和充电操作期间的整体功率损耗。



输出电压降

ORV3 BBU规范的另一个要求是在放电工作模式期间考虑压降。电压下降是指在驱动系统负载时有意降低BBU背板电压的现象。BBU背板电压将根据LTC2971在线DAC测得的系统负载电流而实时改变。因此，从空载到满载的背板压降保持在ORV3 BBU要求的±1%限值以下。参见图7。

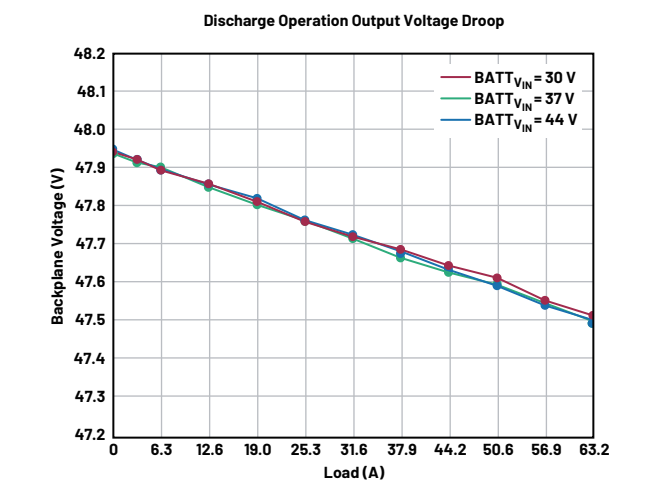


图7. 放电工作模式期间的输出压降。

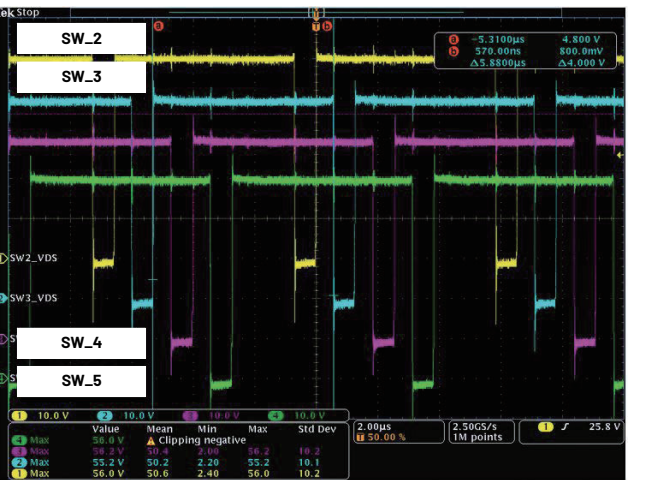


图8. 以44 V输入和63.2 A输出负载运行时，放电工作模式期间主控制器和扩展器的开关波形。

开关波形

检查开关波形可为性能评估、故障分析、效率优化、降低EMI和安全考量提供有价值的信息。它让工程师能够发现和解决问题，优化系统性能，确保数据中心BBU模块可靠、高效运行。

BBU模块的开关操作在放电工作模式期间至关重要，它将30 V至44 V电池包电压转换为48 V背板电压。这是通过同步功率MOSFET实现的，它由LT8228脉冲宽度调制(PWM)信号准确调节，配套的LT8551重复LT8228的操作。每相的开关频率和均流导致电压升高，是影响其运行的重要因素。主转换器及其多相扩展器在满载时的开关波形如图8所示。在充电工作模式中，双向转换器以单相操作，将49 V至53 V背板电压降低至44 V，为电池包充电。它的工作原理是快速切换同步功率MOSFET并使电感电流斜坡上升。双向转换器在5 A负载下的开关波形如图9所示。



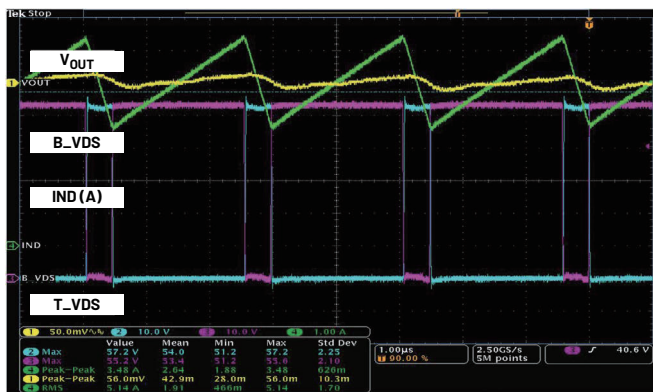


图9. 以53 V输入和5 A输出负载运行时，充电模式期间主控制器的波形。

热性能

必须仔细平衡热性能和效率。BBU模块必须能够承受高温并持续工作，而不会过热，同时也要以理想效率运行，能够将尽可能多的输入功率转化为输出功率。在图10中，在放电工作模式

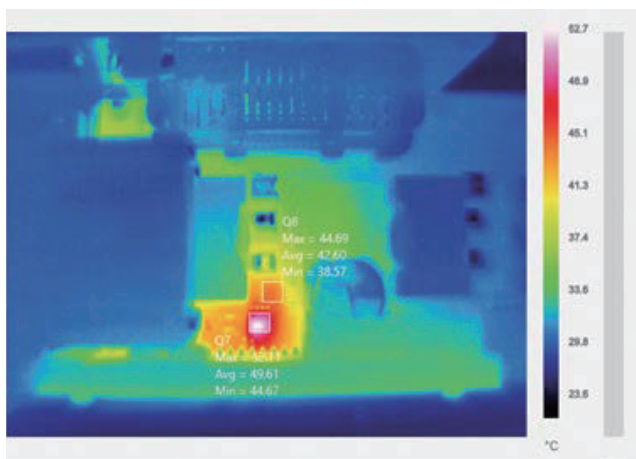
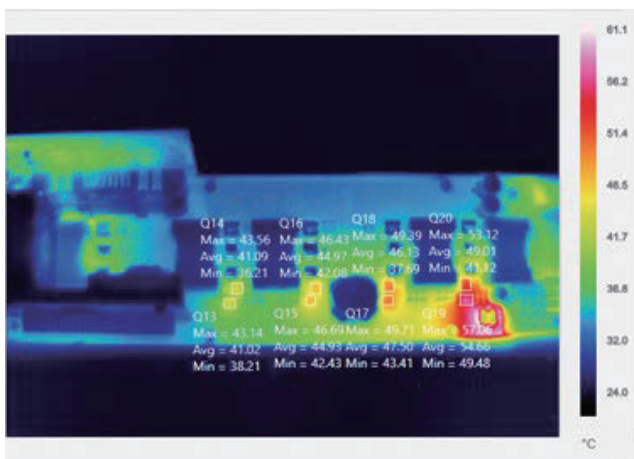


图10. 放电和充电工作模式下各自满载运行时电路板的热性能。

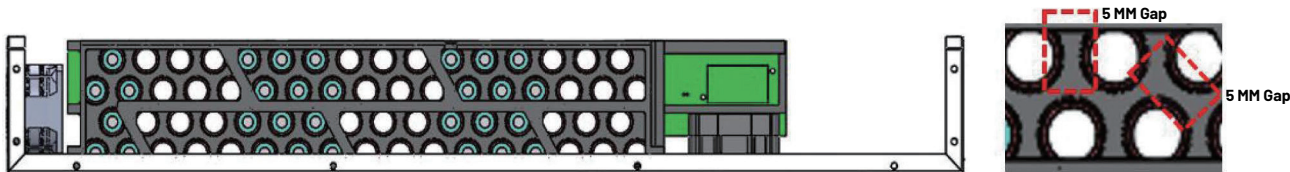


图11. 电池堆间隙设计。

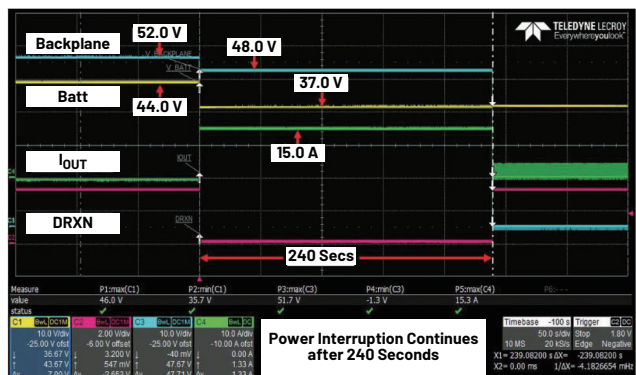
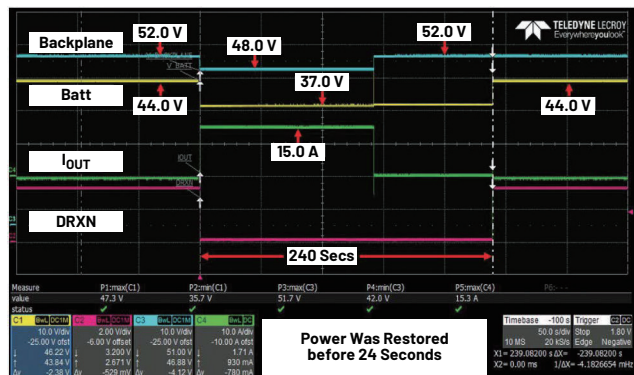


图12. 从稳定状态过渡到电源中断状态。

(满载运行约4分钟) 期间测得的电路板最差温度仅为40°C至60°C。在充电模式下，同步MOSFET的温度低于50°C。合理构建的空气散热系统可降低元器件的发热量，防止热失控。为避免电池堆过热，需要设计合理的电芯间距和适当的气流。参见图11。

工作模式转换

BBU模块的工作模式转换对于确保电源中断或变化期间的不间断供电至关重要。此过程包括将电池包能量顺利传输到数据中心的背板，确保重要系统和设备保持正常运行4分钟。BBU模块持续监测背板母线电压。当母线电压在2 ms内下降至BBU模块激活电平(48.5 V)时，BBU模块背板电压必须斜坡上升，以在2 ms内为母线提供全部功率。在整个转换过程中，母线电压不得降至46 V以下。BBU模块检测到母线电压超过48.5 V并持续200 ms以上后，退出放电工作模式。参见图12。

总结

为了节省能源，数据中心正在转向采用48 V系统。由于电流、铜损和电源母线尺寸更小，48 V服务器机架在功耗、散热、尺寸及成本方面比12 V服务器机架更具效益。前端无调节的高效率电路级，后面接一个根据适当负载调整的稳压器，这样的设计非常适合数据中心服务器微处理器和存储器。这种高水平的思考，加上OCP的最新创新，为实现更高效的配电和智能备用电池单元设计奠定了基础，从而可以支持连续和无缝的操作。

为BBU模块和层板选择并实现合适的器件可以简化整体设计，延长电池使用寿命，缩短漫长的工程开发周期，并有效降低工

程和生产成本。此外，提供机械仿真可以简化原型制作步骤，获得可用于改进散热和热管理的数据，并增强设计可靠性。最后，提供适当且精心设计的固件算法和序列可确保BBU轻松地运行。

本系列的第二部分将针对面向BBU一般管理任务的专门设计，介绍BBU模块的各种主要微控制器功能和操作。此外，第二部分将更深入地概述如何监测有用信息，以及如何使用这些信息来构建和执行正确的工作流程。

作者简介

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的高级应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

Gary Sapia毕业于德克萨斯农工大学，修读了电力电子和RF系统设计专业的高级技术课程，获工程学士学位。他拥有超过28年的模拟系统设计和开发经验，包括用于通信和GPS市场的电源转换和高频解决方案。在加入ADI公司之前，Gary在凌力尔特（现为ADI的一部分）担任现场应用工程师18年，主要与思科和其他重要的湾区网络公司开展合作。

Marvin Neil Solis Cabueñas毕业于菲律宾马尼拉德拉萨大学，获电子工程学士学位。在2021年加入ADI之前，Marvin曾在Azeus Systems菲律宾公司担任系统工程师，然后在Technistock菲律宾公司担任网络工程师（2014年至2017年），并在2017年至2020年担任诺基亚技术中心菲律宾公司的研发工程师。他在不同领域拥有超过十年的工作经验，如嵌入式系统编程、数字信号处理、仿真建模等。目前担任高级软件系统工程师，负责ADI电源事业部的不同项目。目前正在攻读菲律宾大学电气工程硕士学位。

模拟对话

实现不间断能源的 智能备用电池第二部分： BBU微控制器的功能和操作

Christian Cruz, 应用开发工程师

Marvin Neil Cabuenas, 高级固件工程师

摘要

开放计算项目(OCF)是一个非营利组织, 专注于推动各企业在数据中心产品设计及最佳实践方面加强交流。近日, 该组织发布了开放机架第三版(ORV3)规范。规范中比较显著的变化在于设计架构从12 V迁移到了48 V。本系列文章重点介绍ADI公司的备用电池单元(BBU)参考设计, 分为五部分, 这是第二部分。“[实现不间断能源的智能备用电池第一部分: 电气和机械设计](#)”讨论了BBU的电气和机械设计考虑因素。第二部分将深入介绍微控制器的软件, 该软件主要负责确保进程平稳运行, 从而为BBU的高效率和容量提供保障。硬件和软件必须顺畅协作, 才能实现满足规范要求的系统级解决方案。

简介

在BBU模块中实施优良的管理至关重要, 这能带来诸多显著的好处。保持电路井然有序的主要优势在于, 可以增强和提升安全性, 从而降低模块发生电气火灾和其他危险的风险。此外, 优良的管理方式可以防止发生可能干扰正常运行的电气故障, 从而提高电路性能, 延长使用寿命。定期监控和整理电路以识别和解决可能出现的问题或故障至关重要。将良好的管理方式放在优先位置, 可以确保电路具有优异安全性和性能, 此方法简单而有效, 不容小觑。每个BBU模块均采用一个微控制器和一个电池管理系统(BMS)微控制器。在ADI公司的参考设计中, 超低功耗Arm®微控制器MAX32690充当微控制器, 负责执行六个重要进程

(见图1)。MAX32625微控制器充当参考设计的BMS微控制器。BMS微控制器负责与ADBMS6948芯片通信, 并将所有测量数据传递给微控制器。

微控制器的六个进程如下

- ▶ 执行管理任务和通过I²C协议与各种外设进行通信。
- ▶ 处理由背板电压数据提供的放电序列。
- ▶ 选择恒流模式或恒压模式处理电池的充电工作。
- ▶ 转变BBU模块的充放电状态。
- ▶ 故障处理和响应。
- ▶ 作为Modbus从机响应Modbus命令。

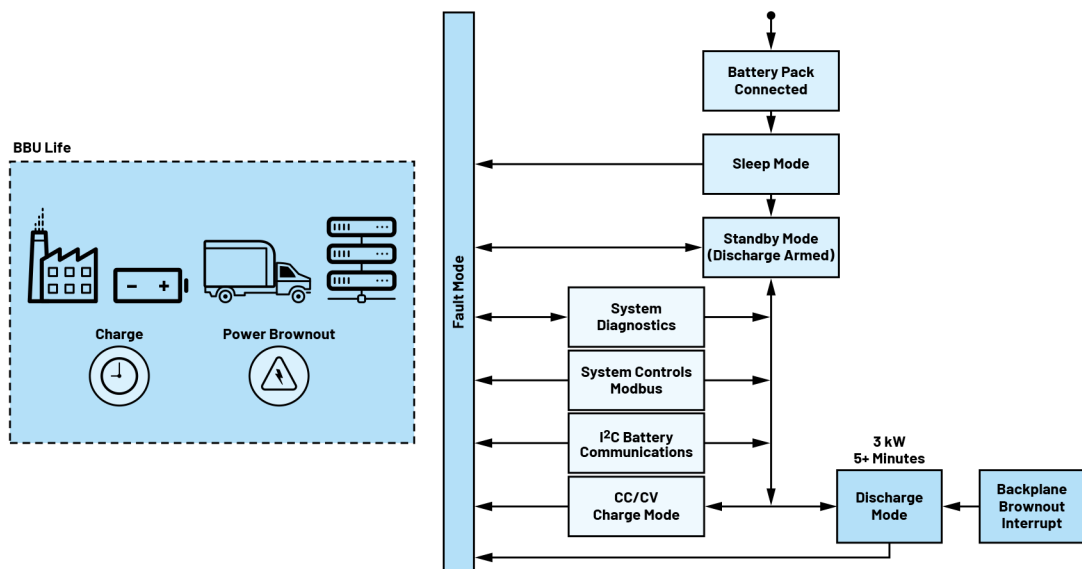


图1.主控制器的管理操作周期¹

微控制器进程：

执行管理任务和通过I²C与各种外设通信

在众多辅助器件连接到模块电路的情况下，微控制器用作I²C主器件。核心微控制器收集并保存来自辅助器件的数据，同时充当I²C主器件。为了推进各种任务顺利进行，微控制器还负责控制各种I²C辅助器件。多款I²C辅助器件示例如下：

- BMS微控制器采用MAX32625。
- LTC2971，双通道电源系统管理器。
- MAX31760，精密风扇速度控制器。
- 24AA512T/EEPROM，用作数据存储，可检索和存储重要数据。
- LTC2991，温度传感器。

BMS微控制器(MAX32625)

微控制器定期与BMS微控制器(MAX32625)通信，接收有关各个电池包的电芯电压、充电状态(SOC)、健康状态(SOH)、电芯温度以及电池包可能出现的任何故障的更新信息。更新每四分钟进行一次，因为电芯电压、SOC、SOH和温度预计不会快速变化。如果发生任何故障，两个微控制器之间的共享引脚将置为高电平，并触发微控制器上的中断，进而立即读取BMS微控制器，获取有关故障的信息。微控制器中有专用I²C端口，仅用于与BMS微控制器通信，以支持两个微控制器之间快速通信。

LTC2971（电源管理IC）

微控制器时常通过电源管理总线(PMBUS)协议与LTC2971通信，检查电压、电流和温度测量结果以及有无警告和故障。当测量背板输出电压参数时，LTC2971起到快速反馈作用，以便微控制器调整其例程。此外，该器件会调整电源变换器的反馈电压，并允许将其输出电压下调1%，从而确保放电工作模式下输出电压处于调节范围内。

MAX31760（风扇控制器）

MAX31760负责调节BBU模块的风扇速度。脉冲宽度调制的占空比由微控制器配置，以通过I²C调节风扇的速度。微控制器根据温度以及背板负载电流或电池包负载电流，计算并调整所需的风扇速度。

24AA512TT（EEPROM/数据存储）

板载EEPROM充当整个BBU模块的外部存储器件。微控制器通过I²C写入闪存页，定期将电池电压水平、SOC、SOH、电芯类型和型号年份以及电路板温度等重要信息保存至EEPROM中。该数据每小时更新一次，用户可以在维护和故障排除期间访问。

LTC2991（数字板载温度监测）

LTC2991是一款八通道电压、电流和温度传感器。该器件借助放置在电池模组内部重要位置的各种数字传感器，监测电池模块的温度。根据温度读数，微控制器可以调节风扇速度，确保电源板和电池堆的工作温度保持在适当水平，并且始终低于40°C。

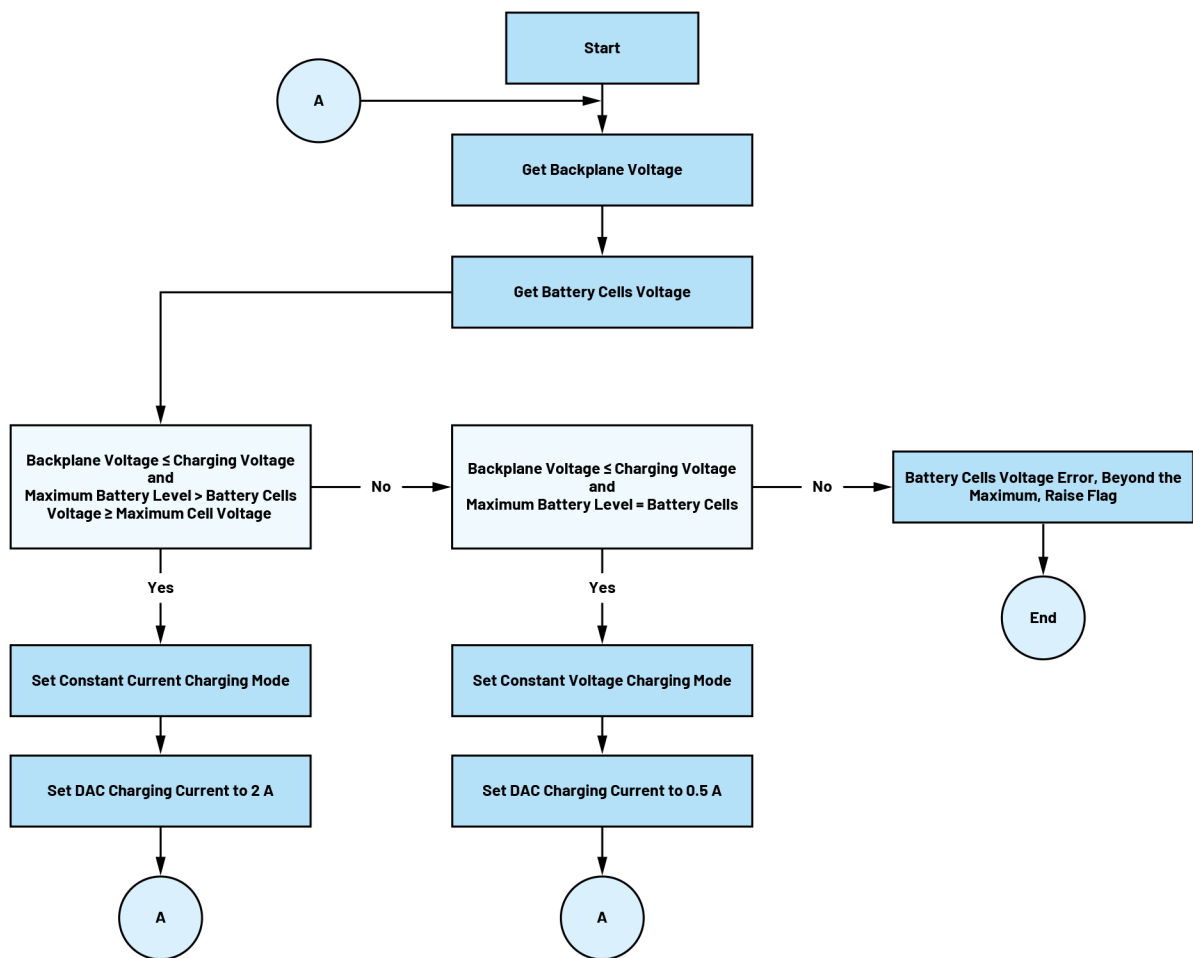


图2. 恒流和恒压充电算法

选择恒流模式或恒压模式处理电池的充电

微控制器还负责处理电池的充电模式。开始时，电芯的电压容量非常低，微控制器允许以最大5 A的电流为电芯充电。一旦电芯处于稳定状态，微控制器就会将充电电流调整为2 A，此时每个电芯的电压尚未达到4 V。利用来自BMS微控制器的数据持续监测电芯电压，并使用模数转换器外设测量整个电池层电压，微控制器便可以判断所有电芯是否都已达到4 V，如达到4 V，微控制器便会将充电模式切换为恒压模式。这需要将充电电流限制为仅0.5 A。微控制器将继续监测整个电池层电压水平，同时从BMS微控制器获取数据，检查所有电池是否充满电。如图2所示。

电源变换器充放电状态的转变

充分了解BBU在电源中断期间如何从待机模式转变到电池供电模式至关重要。为了防止任何意外断电和数据丢失，模块的微控制器密切监视背板电压水平。LT8228的默认充电模式设置在49 V至53 V左右，但如果微控制器检测到背板电压在2 ms内降至48.5 V以下，则会立即将LT8228方向引脚从充电模式切换到放电模式，这种模式持续四分钟以处理停电情况。这四分钟里模块

将持续放电，以确保供电不间断。如果电芯的条件允许且背板电压供应仍未恢复，模块将再等待一分钟，以便电芯冷却，然后再次进入放电模式。电源恢复后，BBU将切换回主电源，并开始为电池充电。有关如何操作和维护BBU的具体说明，请参考图3了解此过程。

故障处理和响应

制定明确的故障处理计划非常重要。为了避免产生压力和得到不好的结果，提前发现潜在问题并制定处理方案至关重要。如需确保系统操作顺利运行，了解即将发生的情况，那么与相关系统中集成的器件进行顺畅通信也是非常必要的。请记住，错误和故障难以完全避免，而应对方式才是决定结果的关键。因此，微控制器经过专门设计，可减少OCP指定故障的误报发生率。微控制器中的固件程序执行算法检查以检测可能触发故障的前兆现象。检测到相关征兆后，算法将执行验证检查，只有在问题连续发生或在设定的周期数内发生时，才会确认故障。这种做法非常明智，可以确保识别和解决真正的故障。

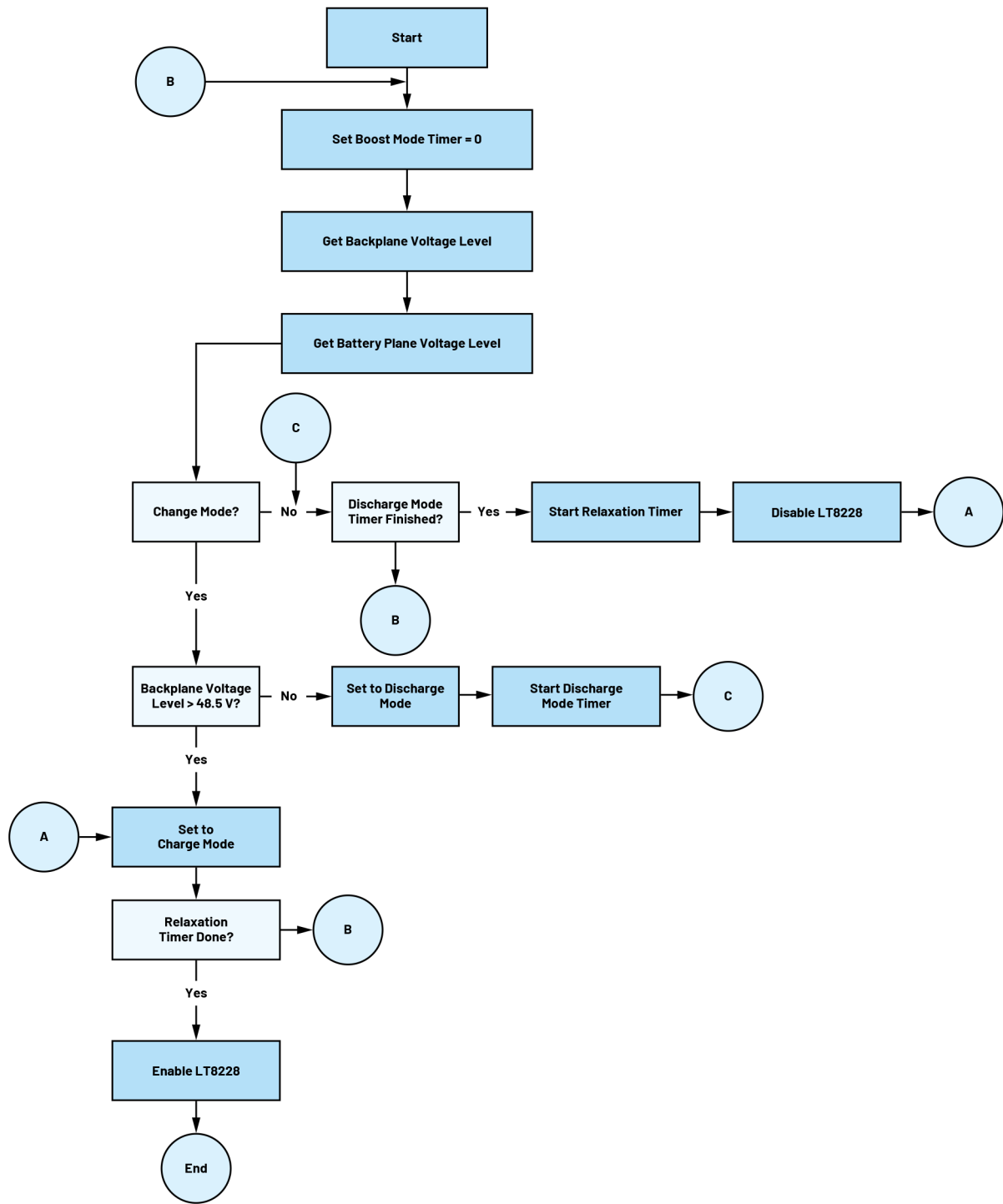


图3. 充放电模式转换的处理操作

作为Modbus从机响应Modbus命令

Modbus功能代码对于在Modbus网络的器件之间建立通信至关重要。这些代码确定器件之间发送的请求或响应的类型，例如读取或写入数据。一些比较常见的Modbus功能代码包括模块指标、模块工作状态、模块寄存器地址和故障状态。

Modbus命令的处理完全由微控制器控制。微控制器可以为OCP规范认为必要的所有基本Modbus命令提供支持。这些命令有权更改模块的设置，或提供有关电池SOC、运行状况、电芯电压水平、充电和放电电流以及其他参数的重要信息。微控制器验证消息后，就会根据收到的命令做出响应。

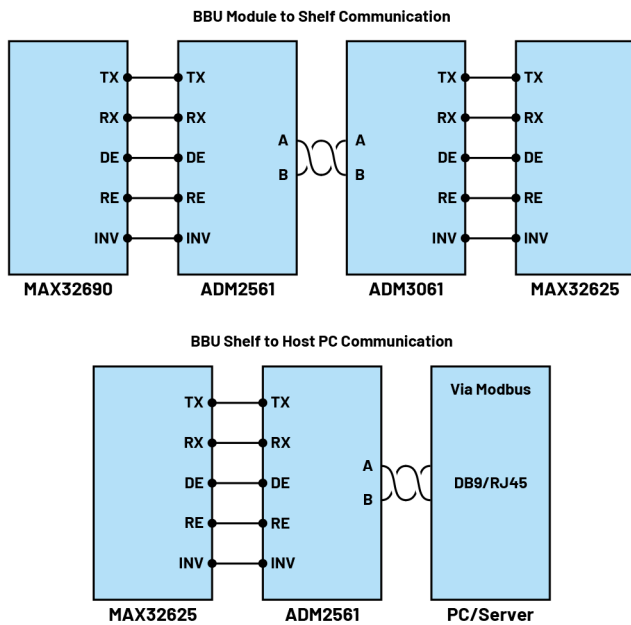


图4. 模块到机架通信和机架到PC通信框图

微控制器利用ADM2561和ADM3061收发器，通过UART协议处理来自各种外设的数据，并将其传输到机架微控制器，如图4所示。

采用隔离型收发器的优点在于，它不受系统级电磁干扰的影响，并且符合OCP制定的电磁兼容性(EMC)标准。此外，机架到PC的通信是通过ADM2561完成的，ADM2561通过DB9 (D-Subminiature)连接器和RJ45互联网端口连接到主机PC。

总结

控制器架构必须要满足稳健可靠、高效且适应性强的要求，同时应该具有明确定义的输入和输出，并可以处理复杂算法例程。该架构应该是模块化的，以便支持无缝的算法更改和更新。此外还应内置有安全机制，以防范系统故障或事故，并能轻松处理意外事件。总的来说，高质量的控制架构应提供可靠且高效的系统控制，同时可以降低错误或故障发生的概率。

本系列的第三部分将介绍BBU BMS及其相关的微控制器，讨论如何处理和使用可读数据来维持电池包芯间电压和电池包温度。除了电池平衡之外，还将探讨SOC和SOH算法的实现，以及如何利用这些信息来延长电池包生命周期。

参考文献

¹ David Sun. “[开放机架/规格和设计](#)。” 开放计算项目。

作者简介

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

Marvin Neil Solis Cabueñas毕业于菲律宾马尼拉德拉萨大学，获电子工程学士学位。2021年加入ADI公司。此前，Marvin曾在Azeus Systems菲律宾公司担任系统工程师，然后在Technistock菲律宾公司担任网络工程师（2014年至2017年），并在诺基亚技术中心菲律宾公司担任研发工程师（2017年至2020年）。他在不同领域拥有超过9年的工作经验，如嵌入式系统编程、数字信号处理、仿真建模等。目前担任高级固件工程师，负责ADI电源事业部的不同项目。目前正在攻读菲律宾大学电气工程硕士学位。

模拟对话

实现不间断能源的 智能备用电池第三部分： 电池管理系统

Christian Cruz, 应用开发工程师

Marvin Neil Cabuenas, 高级固件工程师

摘要

本文介绍ADI公司为开放计算项目(OCPI)开放机架第3版(ORV3)备用电池单元(BBU)的电池管理系统(BMS)开发的算法。BMS是任何数据中心BBU必不可少的设备,其主要作用是通过监视和调节电池包的充电状态(SOC)、健康状况和功率来确保电池包的安全。因此,BMS是数据中心中复杂而重要的组件,必须谨慎设计和实施。

简介

在探索ADI公司的BBU参考设计时,有必要了解BMS的工作原理。BMS负责监视和调节电池的状况,确保电池在安全参数内运行。其中包括监视电池堆电压、电池堆温度和电池堆整体电流水平,以及管理充电和放电周期。稳健的BMS可以使系统实现理想效率和安全性。延长电池寿命对于维持峰值性能至关重要。在不知情的情况下频繁过度充电或过度放电,会损害电池健康,缩短电池使用寿命。通过仔细监测电池的健康状态(SOH)并正确使用,可以避免电池意外关闭或故障,使电池发挥理想性能。

此外,监视电池的SOC对于电池堆的整体健康状况非常重要。随着时间的推移,电池会损失容量,而电量耗尽至零会加速电池容量的损耗。延长电池寿命的理想方法是将电池电量保持在20%到80%之间。了解电池的SOC可确保BBU模块持续运行更长时间。

除了SOH和SOC之外,还必须更好地了解放电深度(DOD)。DOD是使用充电电池时需要考虑的一个重要因素。它是指在单次放电循环中消耗的电池容量百分比。一般来说,为了延长电池整体寿

命,建议避免将电池放电至20% DOD以下。然而,一些电池可以承受更深程度的放电而不会造成明显损坏。务必查询制造商的指南,了解特定电池的具体放电深度建议。

此外,仔细考量电池的化学特性至关重要。在BBU模块的设计中,使用锂离子(Li-ion)电池是一个谨慎的选择。选择锂离子电池是因为它已得到广泛使用,与OCPI ORV3规范的要求完全一致¹。这种一致性的背后原因在于锂离子电池的优良特性,即出色的能量密度和非常轻的重量。值得注意的是,深入研究锂离子电池的化学成分揭示了一个至关重要的事实:锂离子电池的化学成分是一个复杂的关键因素,始终决定着电池的性能、安全性和整体耐用性。

另一个需要考虑的方面是电池平衡。电池平衡是电池技术领域的一个重要概念。随着对高效、高性能电池的需求不断增加,实现理想的电池平衡变得越来越重要。电池平衡是指均衡电池包内各个电池的电压或SOC的过程。在包含多个电池的电池包中,每个电池都有各自独特的特性,并且随着时间的推移,电

池性能可能会发生变化。制造容差、电池容量变化以及使用模式差异等因素，都可能导致电池不平衡。这些不平衡可能造成电池总容量减少、效率降低，甚至电池包过早失效。相关设计要求BBU上有一个被动平衡器。因此，被动平衡涉及使用电阻来泄放或消耗电压水平较高的电池中的多余能量。这种方法相对简单且经济高效，但会导致能量损失和热量产生。电池平衡可确保电池包中的每个电池都以理想水平运行，从而提高储能系统的整体效率和有效性，有助于BBU模块系统更加可持续和可靠地运行。BBU中使用的BMS微控制器是MAX32625。BMS微控制器负责两个重要的过程。参见图1。

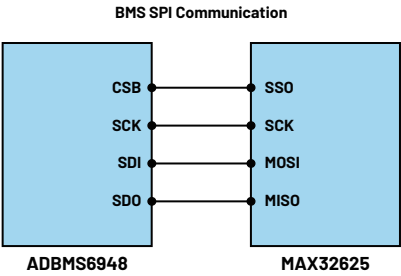


图1. 连接到BMS IC (ADBMS6948)的BMS微控制器(MAX32625)。

1. 与BMS IC (ADBMS6948)通信，获取电池电压、电池温度、欠压、过压和整体电池堆电流水平的遥测数据。
2. 通过I²C通信将从器件收集的所有遥测数据传递到主微控制器。

BMS微控制器通过SPI协议与ADBMS6948通信。通过发送适当的命令代码，BMS微控制器允许该器件收集遥测数据并同时执行操作。参见图2。从BMS IC收集的所有数据都将由BMS MCU发送和处理。

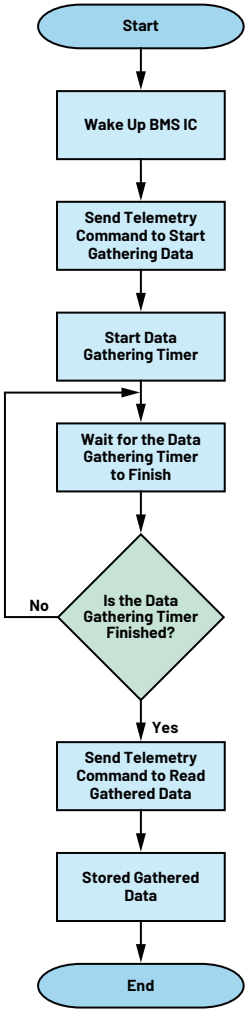


图2. BMS微控制器发送命令和存储BMS芯片数据的过程。

BMS微控制器的另一个重要任务是将收集到的数据发送到主微控制器，用于充电和放电算法及风扇转速控制。这是通过与BMS微控制器进行I²C协议通信，然后由主微控制器读取寄存器来完成的。BMS微控制器的寄存器映射如表1所示。

表1. BMS微控制器寄存器映射

寄存器	地址	长度（单位：字节）
CMD_Voltage	0x00	0x16
CMD_Temperature	0x01	0x08
CMD_SOC	0x02	0x16
CMD_Fan_Error	0x03	1
CMD_EOL	0x04	1
CMD_Stop_Discharge	0x05	1
CMD_BMS_Fault	0xE0	0x06
CMD_Manufactured_Date	0xF0	0x07
CMD_Serial_Number	0xF1	0x07

请注意，目前所有BMS微控制器寄存器都是只读寄存器。构建日期和序列号仅采集一次，然后存储在主微控制器的外部EEPROM中。

电池检测 and 平衡操作

电池充电技术

恒压(CV)和恒流(CC)是电池充电系统中采用的两种不同充电技术，可优化充电过程并延长电池寿命。

CV充电

CV充电是一种在充电初始阶段向电池堆施加固定电压的充电方法。充电过程开始时，BBU模块工作在充电模式，保持44 V的稳定电压水平，充电电流从5 A开始，随着电池SOC的增加而逐渐减小。这种方法对于防止过度充电特别有效，因为电压保持恒定，不会超过电池的安全电压限值。电池堆电压达到37 V至40 V或预定义阈值后，充电器可能会转变到其他充电阶段，例如将充电电流从5 A减少到0.5 A。

CC充电

CC充电则是向电池堆端子施加一致的充电电流。在此阶段，充电电流保持在5 A不变，而电池电压随着电池充电的进行而逐渐升高。

该方法对于初始充电水平较低的电池堆快速充电特别有用。它确保电流以受控方式流入电池堆，直至达到一定的电压水平。电池堆电压达到预定点后，充电过程可以转变到其他阶段，例如将恒定电流从5 A减小到2 A，或者进入恒压阶段。

在BBU模块电池堆充电模式中，CV和CC充电方法经常结合使用，以获得理想的充电曲线。前期CC阶段帮助快速向电池传输能量，而后期CV阶段则通过限制电压来避免过度充电。这种组合技术可实现高效充电，延长电池寿命，并保持电池包的安全性和性能。正确实施CV和CC充电机制对于BBU模块充电操作至关重要。

电池检测方法

电池检测方法是电池管理系统的一个关键方面。此技术旨在精确定电电池包中每个电池的电压和状态。电池检测方法采用复杂的检测电路和测量算法，让系统能够收集有关每个电池的电压、温度和整体健康状况的实时数据，然后利用这些信息做出有关充电、放电和平衡操作的明智决策，从而优化电池包的性能、安全性和使用寿命。有效的电池检测对于维持现代储能系统的整体效率和可靠性至关重要。

ADBMS6948有11个ADC，专门用于检测电池包的11个差分电池输入。电池堆采用11路串联和6路并联配置，并连接到C0至C10引脚，即BMS的ADC。ADC的输入范围为-2.5 V至+5.5 V，采样频率约为4 MHz，每1 ms产生16位结果，LSB为150 μV。另有11个ADC专门利用S引脚同时测量11个差分输入，输入范围为0 V至5.5 V，采样频率约为4 MHz，每8 ms产生13位结果，LSB为1.6 mV。这些S-ADC通过完全独立于C-ADC的测量方法实现冗余电池电压测量。

被动平衡操作

被动平衡是电池系统管理中常用的技术，它采用无源元件（特别是电阻）和并联在每个电池上的集成MOSFET来实现电池平衡。这些集成元件承担电压泄放器或能量耗散器的作用，有利于让表现出较高电压或能量状态的电池以受控方式耗散多余的能量，使得电池之间的电压电位或能量状态逐渐协调一致，从而在较长时间内促进电压和能量平衡。

如果电池包中的电池变得不平衡，BMS必须通过让电压较高的电池放电来达成平衡。ADBMS6948上的S-ADC引脚可用于对单个电池进行放电。S-ADC引脚上内置的MOSFET可用于对电池进行放电。每个S-ADC引脚都可以使用PWM单独或连续控制。通过配置PWMA、PWMB和CFGB寄存器，还可以在BMS微控制器处于休眠工作模式时平衡电池。

使用库仑计数器的电池充电

库仑计数器的主要作用是准确测量流入流出电池或电路的电荷量（以库仑为单位）。通过这种测量，可以更好地控制电池堆充电和放电，从而延长电池堆寿命，提高效率，并且更准确地监测容量。

ADBMS6948集成了库仑计数器，因此可以监测充电过程中流经电池的电荷量。库仑计数器也称为集成电流传感器或电荷监测器，用于测量流入或流出电池的电荷总量（以库仑为单位）。使用库仑计数器进行电池充电时，计数器会监测输送到电池的电荷量。这是通过测量流经电池的电流并将其对时间积分以计算总电量来完成的。因此，估计电池的SOC并实施充电算法可以优化充电过程。

ADBMS6948库仑计数器的基本操作涉及将流入流出电池堆的电流对时间积分，以计算传输的总电荷。其工作原理如下：

- ▶ **电流测量：**该器件测量流入或流出电池堆的电流。这通常利用电流传感器（例如连接在电池堆低端的分流电阻）来完成。
- ▶ **积分：**使用ADBMS6948将测得的电流对时间积分。积分涉及定期对电流值求和以计算累积电荷。
- ▶ **容量计算：**累积电荷转换为安时(Ah)或库仑，以提供有关电池堆剩余容量的信息。
- ▶ **监视与显示：**计算出的容量经过处理后传输到主MCU，并显示在图形用户界面上以供进一步处理。该信息对于电池管理、确定SOC以及防止过度充电或过度放电非常有价值。

充电时，库仑计数器会连续测量流过电池的电流，并将其对时间积分。通过了解电池的初始SOC，可以将积分电量与初始值相加来估计充电期间的SOC。此估计有助于防止过度充电，并支持实施充电算法，根据温度、电池使用时间和化学成分等因素优化充电过程。

请查看ADI公司之前的文章，了解电池平衡和电池寿命优化技巧。对于希望详细了解该主题的人士，强烈建议阅读这些资源。Kevin Scott和Sam Nork撰写了两篇关于电池平衡类型的文章：“[被动电芯平衡](#)”和“[主动电芯平衡](#)”。有关电池特性测试的更多信息，请参阅“[配合电量计使用的锂离子电池特性测试](#)”。

总结

综上，ADI公司的ADBMS6948 BMS与BBU的集成至关重要。BMS具有许多优点，可以改善电池系统的性能、安全性、可靠性和寿命。通过优化电池性能，良好的BMS有助于最大限度地延长电池寿命和提高容量，确保高效利用电池的储能能力。BMS可以主动管理充电和放电过程，防止过度充电、过度放电和过热，避免损坏电池。安全性是一个关键方面，尤其是对于电池系统。BMS整合了安全功能和监控机制，以防止热失控并最大限度地减少潜在危险。它能防范过流、过压和异常温度情况，从而保护电池系统和周围环境。能效是BMS的另一大优势。优化充电和放电过程可最大限度地减少能量损失，并提高BBU的整体效率。这意味着可以节省成本，减少对环境的影响，增加可用能源的利用率。

BMS还能准确监测和估算电池堆的SOC和SOH。这些信息对于正确管理电池使用情况、计算剩余运行时间以及规划维护或更换时间至关重要。添加库仑计数器对于精确测量和监测非常重要。此信息对于在各种应用中实现高效电池管理和延长电池寿命至关重要，有利于提高系统可靠性并降低意外故障的可能性。

总之，BBU中包含的ADI ADBMS6948 BMS在保证数据中心的性能、安全性和可靠性方面发挥着重要作用。它可以提供每位用户都应该了解的关键信息，以帮助延长电池使用寿命。

本系列的第四部分——“实现不间断能源的智能备用电池第四部分：BBU架的操作”——将介绍ADI公司如何设计和实现图形用户界面，同时允许用户与BBU架上的六个BBU模块进行通信并从中收集数据。该文还会说明作为BBU架专用MCU的MAX32625的功能和操作。

“[实现不间断能源的智能备用电池第一部分：电气和机械设计](#)”讨论了BBU的电气和机械设计考虑因素。“[实现不间断能源的智能备用电池第二部分：BBU微控制器的功能和操作](#)”进一步详细介绍了主微控制器的软件。

参考文献

¹David Sun. “[开放机架/规格和设计](#)。”开放计算项目。

作者简介

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

Marvin Neil Solis Cabueñas毕业于菲律宾马尼拉德拉萨大学，获电子工程学士学位。2021年加入ADI公司。此前，Marvin曾在Azeus Systems菲律宾公司担任系统工程师，然后在Technistock菲律宾公司担任网络工程师（2014年至2017年），并在诺基亚技术中心菲律宾公司担任研发工程师（2017年至2020年）。他在不同领域拥有超过10年的工作经验，如嵌入式系统编程、数字信号处理、仿真建模等。目前担任高级软件系统工程师，负责多个与电源相关的技术项目。目前正在攻读菲律宾大学电气工程硕士学位。

模拟对话

实现不间断能源的 智能备用电池第四部分： BBU架的操作

Christian Cruz, 应用开发工程师
Marvin Neil Cabuenas, 高级固件工程师

摘要

本文详细介绍了ADI公司用于开放计算项目开放机架第3版(OCV ORV3)备用电池单元(BBU)架的硬件和软件。其主要功能是建立BBU模块之间的通信, 并通过为此类应用精心打造的图形用户界面(GUI)向用户呈现可读数据和信息。

引言

备用电池架是OCV ORV3架构和数据中心应用中电源管理系统的重要功能, 对于不间断电源(UPS)来说尤为关键。这些架子经过精心设计, 专门用于存放和管理备用电池, 是确保关键设备在停电和电压波动情况下稳定运行的重要保障。

在当今技术高度发达的时代, 可靠备用电源系统的重要性不言而喻。数据中心、电信枢纽和服务器机房的稳定性对公司运营至关重要, 因此强大的备用电源系统必不可少。在这种背景下, 备用电池架作为这些系统的基础, 在各行各业发挥着关键作用。这些架子是高效存放BBU的基础枢纽, 有助于提升关键电力储备的可用性, 其主要作用是容纳和管理多达六个BBU模块, 每个模块都精准对齐以容纳与电源转换器配对的锂离子电池。这些架子的结构经过悉心设计, 巧妙地将空间利用效率和可访问性融为一体, 令维护工作更加便捷, 更换操作也更加简单。

电池备用架的一大优点在于能够集中管理和组织BBU模块库存。一个规范的存放系统有利于对BBU模块进行跟踪、标记和维护, 从而减少误放或混淆的风险, 这对于关键情况尤其重要。此外, 这个集中化的存放系统还为电池健康监测提供了超大便利, 更加便于定期进行检查、测试和更换操作。

BBU架有多种尺寸和配置, 可满足不同行业和机构的个性化需求。部分架子采用模块化设计, 提供了灵活性, 可适应未来电力需求的发展。同时, 这些架子上装有集成监控系统, 可实时提供电池状态信息。此外, 电压水平、温度、模块活动和剩余容量等详细信息也一目了然, 方便进行预防性维护, 并确保电池在关键时刻随时可以提供电力。

BBU架概述

根据OCV对ORV3新架构的定义, 开放机架电源架构由集中式可扩展电源架和BBU架组成, BBU架通过公共母线将电力分配给有效载荷设备(IT设备)。此规范对适合放入开放机架的BBU架做出了定义。BBU架将包含六个BBU模块, 具有5+1冗余能力, 为机架内的所有有效载荷提供直流电源。当交流电源断电时, BBU架可以在指定的备用时限内持续提供备用电源, 功率最高可达电源架的最大额定值。BBU架的备用时间使机架可以在不同电源之间切换而不影响IT设备运行, 并且应用程序可以在电源断电前安全转移或关闭。

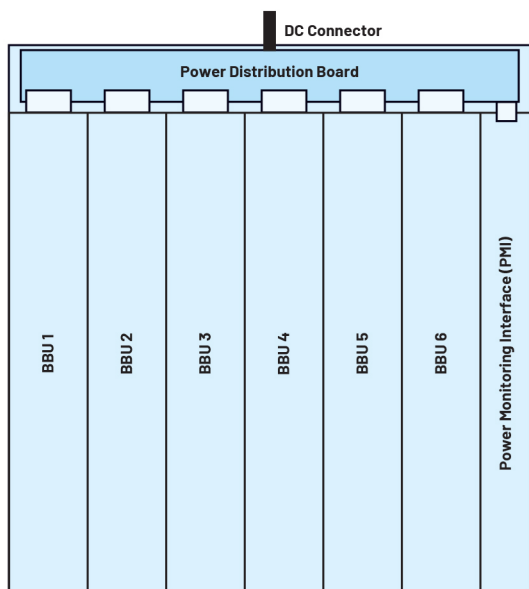


图1. OCP ORV3架构中的BBU架配置¹。

架微控制器固件

BBU应用中使用MAX32625作为架微控制器，这是一款超低功耗Arm® Cortex®-M4微控制器，在应用中需负责多个过程。

1. 通过Modbus®协议与主机通信
2. 通过Modbus协议与模块通信
3. 处理模块的定期充电
4. 系统控制模式

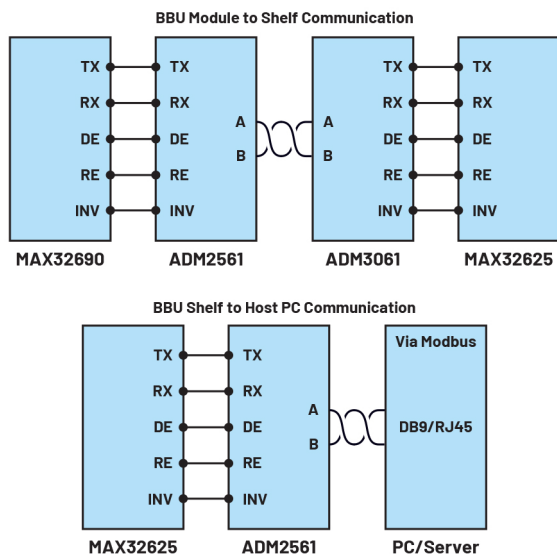
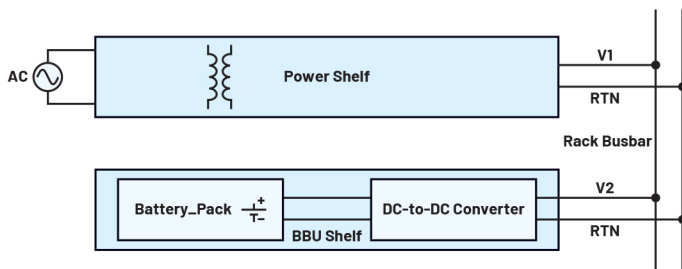


图2. (a)模块到架的通信示意图，(b)架到PC的通信方框图。



通过Modbus协议与主机通信

在图2中，架微控制器发挥的关键作用是充当专业Modbus服务器，通过稳健的RS-485接口与主机建立无缝通信，主要功能是不遗余力地实时从众多模块收集数据。随后将所采集的数据传送到主机，用于填充动态GUI应用程序，从而提供更直观的图形展示。当从主机接收到通信时，架微控制器充当“门卫”，有条不紊地验证每条消息的有效性和完整性。微控制器确认消息的真实性满足要求后，会利用保持寄存器中存储的信息量快速地拟定答案。这个精心设计的响应包含主机所需的答案，答案以结构化的方式呈现。

然而，当传入的消息受到异常污染时，架微控制器不会发生故障，而是会迅速承担起有效通信者的角色，根据Modbus协议以错误消息进行响应。此错误通知会向主机发出异常警报，以便后者采取适当的纠正措施。

本质上，架微控制器的重要性体现在其所扮演的多方面角色上——它既是数据管道，又是数据完整性守护者，还是响应式信息提供者。所有这些都有助于在Modbus驱动的人际领域构建强大而可靠的通信框架。

通过Modbus协议与模块通信

在图2中，架微控制器的关键作用愈发明晰，它在Modbus客户端和Modbus服务器的角色之间无缝转换，协调复杂而高效的通信生态系统。当与许多BBU模块交互时，架微控制器扮演Modbus客户端的角色，发起并维护与每个唯一模块的对话。这些BBU模块

充当Modbus服务器，不断使用最新信息更新其保持寄存器。在同步工作时，架微控制器还以循环方式遍历BBU模块环境，定期捕获来自每个模块的遥测数据。这些包含有用洞察的数据被小心地存储在微控制器的存储器中，以便在主机提出问题时可以随时做出回答。

不过，架微控制器的用途不仅限于BBU系统内的客户端-服务器交互，还可以转换为Modbus服务器，根据请求将收集的数据传送到主机，在主机和众多BBU模块之间架起重要桥梁。与此同时，它继续发挥Modbus客户端的作用，管理与BBU模块的交互，并确保信息是最新且准确的。

本质上，架微控制器具备多功能性和适应性，能够灵活地充当客户端和服务端，促进主机与BBU模块之间的交互。这种相互联系表明它有能力维持稳固的通信结构，从而提高整个系统的效率和可靠性。

处理模块的定期充电

根据OCP要求，BBU模块必须定期充电，因为电池包在待机时会漏电。BBU模块每10天只能充电一次，因此架微控制器必须监控和管理哪些BBU模块需要充电。架微控制器通过Modbus协议命令来确定哪些BBU模块需要定期充电，然后启动相应的定期充电操作。OCP确立的标准决定了系统架构中BBU模块的基本需求。这些模块是系统的关键组成部分，必须定期充电，因为电池包在待机期间会发生电流泄漏。换句话说，定期充电是保持最佳性能和运行可靠性的必要操作。

系统控制模式

最后，OCP建议添加用户控制项来覆盖BBU模块操作。通过Modbus，用户可以调整整个BBU的运行状况，以确定其是否需要充电或放电。

BBU架图形用户界面(GUI)

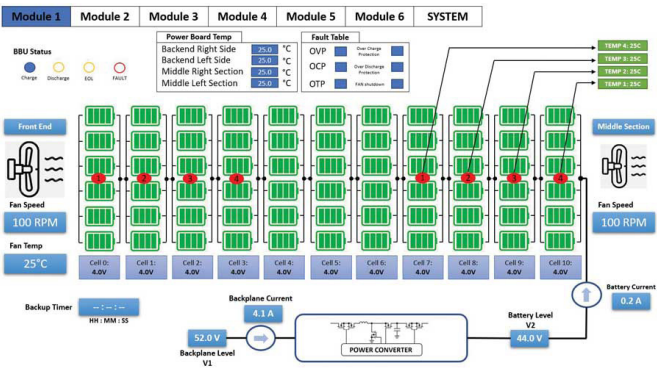


图 3. BBU 模块。

BBU模块GUI分为若干部分，负责向用户提供重要信息，下面将详细介绍具体部分和功能。参见图3。

- 1. 模块运行状态指示灯
- 2. 模块内部温度读数
- 3. 模块故障指示表
- 4. 风扇转速指示（单位：rpm）
- 5. 电源转换器指标信息
- 6. 电芯信息（电压和温度）

模块运行状态指示灯

GUI上至少有4个LED指示灯：

- ▶ 蓝色LED表示BBU模块处于充电工作模式
- ▶ 第一个琥珀色LED表示BBU模块处于放电模式，并为数据中心中心的背板提供备用电源
- ▶ 第二个琥珀色LED表示BBU模块处于寿命末期(EOL)，需要更换
- ▶ 红色LED指示BBU模块发生故障

模块内部温度读数

除了BBU运行状态外，模块的内部温度也会显示在GUI中。电池堆和电源板内至少放置了九个温度传感器。LTC2991向主MCU提供数字温度读数；而ADBMS6948提供电池堆的模拟温度读数。

模块故障指示表

GUI的故障表描述了模块运行期间触发的不同类型故障。模块故障如下：

- ▶ 过压保护(OVP)
- ▶ 过流保护(OCP)
- ▶ 过温保护(OTP)
- ▶ 过放电保护/过充电保护
- ▶ 风扇关停

电源转换器指标

GUI是一项重要资源，可在模块运行时，为电池堆和背板提供重要运行指标。这些指标范围很广，涵盖了输入、输出电压以及电流等关键数据。模块运行和GUI之间的这种动态交互让用户得以完整实时地了解系统性能和能源动态。

电芯信息

GUI会显示电池堆电芯电压和温度水平。这些数据对于确定电池堆的健康状态(SOH)和充电状态(SOC)至关重要。

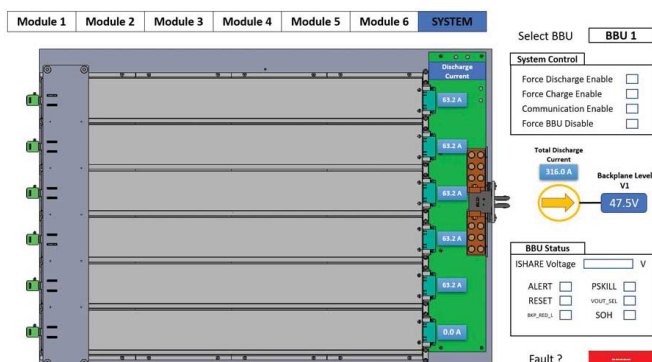


图4. BBU模块摘要GUI。

BBU模块GUI中有一个包含简单摘要和用户控制功能的窗口。这个特定选项卡可以监控所有六个BBU模块，同时支持对特定BBU进行单独控制，包括执行运行决策。图4直观的呈现了相关内容。

- ▶ 地址选择器
- ▶ 架系统控制
- ▶ 架系统参数
- ▶ 架故障和均流

地址选择器

用户可以通过策略性地准确选择BBU槽地址来顺利访问指定的BBU模块。这种策略分配并不是随机的，这是为了防止Modbus通信冲突而采取的预防措施，通过预定义一组BBU架槽地址来实现。

架系统控制

赋予用户修改BBU操作的权限，让用户可以指令特定BBU模块在运行期间充电或放电。选择强制放电模式会导致升压电压从48 V

升高到51 V，从而有利于背板供电，同时让数据中心内的电源单元(PSU)保持运行而不受干扰。这种细微的控制可确保BBU功能与大型基础设施的无缝运行之间保持出色平衡。

架故障和均流

摘要表中会显示在六个BBU模块上检测到的任何故障并通知用户，可以迅速定位BBU架中任何故障。此外，在BBU模块并行或冗余操作期间，均流总线指示器显示当背板负载为最大值时，总线电压为7 V，当峰值负载操作有效时，总线电压为10.5 V。

总结

BBU架是实现可靠电源管理系统的关键组件。这些架子牢牢地相互连接，为备用电池系统创建了一个稳定的环境，是高效管理的核心枢纽。这样就能实现无缝运行，保持关键系统不间断，避免受到断电和电压波动影响。BBU架为数据中心、电信网络 and 任何需要UPS的环境提供重要保护，其主要使命是确保运营的连续性，提高可靠性，并保持电源基础设施稳健运行。本系列的下一篇文章将介绍如何为BBU辅助电路选择合适的组件，其中的标准和建议将有助于为关键设备选择恰当的供电器件，并减少设计不规范问题。

参考资料

David Sun. “[1.1版开放计算项目开放机架V3 BBU架](#)”。开放计算项目，2022年9月。

作者简介

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

Marvin Neil Solis Cabueñas毕业于菲律宾马尼拉德拉萨大学，获电子工程学士学位。2021年加入ADI公司。此前，Marvin曾在Azeus Systems菲律宾公司担任系统工程师，然后在Technistock菲律宾公司担任网络工程师（2014年至2017年），并在诺基亚技术中心菲律宾公司担任研发工程师（2017年至2020年）。他拥有超过10年的工作经验，涉足多个领域，如嵌入式系统编程、数字信号处理、仿真建模等。他现在是ADI的高级软件系统工程师，负责多个与电源相关的技术项目。目前正在攻读菲律宾大学电气工程硕士学位。

模拟对话

实现不间断能源的 智能备用电池第五部分： 辅助电源系统

Christian Cruz, 应用开发工程师,
Ralph Clarenz Matociños, 助理工程师

摘要

本系列文章的第五部分阐明ADI公司备用电池单元(BBU)参考设计中辅助电源的重要性。辅助电源包括与主电源输出一起提供的补充电压轨，用于支持众多组件和功能。它对于确保BBU参考设计模块中集成的电源器件的可靠和高效运行至关重要。

引言

对于采用先进开放计算项目(OCPI)开放机架第3版(ORV3)架构的数据中心、网络、服务器和存储设备，电源单元(PSU)和BBU是支持它们正常运行的命脉。中央电源转换器负责输送所需的大部分电能。辅助电源组件则扮演着幕后的无名英雄，为了维护包括PSU和BBU在内的整个电源供应生态系统的整体稳健性、可靠性和安全性，它发挥了不可或缺的作用。

在接下来的详细讨论中，我们将研究辅助电源在BBU模块参考设计中发挥的作用，探索其功能和内部机制。通过深入探究辅助电源的复杂性，我们的目的是凸显它为了确保不间断电力供应和保护重要技术资源免受损害而作出的重大贡献。

后备电源

辅助电源用于提供BBU内的副电源。即使背板电源中断或不可用，补充电源也会继续为模块内的器件供电，确保BBU内存储的关键操作能够顺利执行。这种后备电源让该单元能够保留和维持重要操作，例如安全转换过程、周密监控、复杂控制电路管理以及为低功耗器件持续供电。辅助电源通过在停电期间提供持续不间断的电源，确保模块在需要时能够分配电力。这反过来可以起到缓冲器的作用，抵御潜在干扰，并防止发生数据丢失。

电压调节

为使BBU内部的器件达到理想性能，确保其处于恒定平衡和恒定电压输出状态至关重要。在这种情况下，怎么强调辅助电源的重要性也不为过，因为它充当关键的保护措施，可以监督BBU模块复杂架构内电压控制的敏感区域。辅助电源持续监测输出电压，在严格定义的容差范围内对电压进行精细调整，使其保持稳定。

这种调节犹如一道坚实的屏障，有效地保障了BBU与其关联器件之间的互动。辅助电源确保能源供应稳定可靠，防止电压波动，避免引发故障、数据损坏或物理损害。

辅助电源通过精密校准发挥关键作用。它不仅让模块保持高效运行，还能保护所连接的器件。凭借出色的精密度和可靠性，数据中心的PSU、BBU和一系列相关器件能够获得更长的使用寿命、更高的效率和持久的运行活力。

散热和风扇控制

有效的散热管理对于防止电气设备过热至关重要。BBU内部的风扇由辅助电源供电并进行协调。此散热过程有助于保护BBU和受支持器件。这种组合利用辅助电源来管理风扇转速，创造平稳高效的散热环境。这样一来，系统能够实现良好平衡，保持理想工作温度，防止过热造成破坏性影响。

热量的耗散涉及热动力学中复杂的相互作用。该系统会管理热量，防止因过热而导致故障。精心的温度调节和辅助电源可提高性能和可靠性。

保护和安全性

BBU具有一系列重要的安全和防护特性，可保护所连接的器件和电源转换器。为了实现这些功能的部署和监督，辅助电源的集

成至关重要。辅助电源支持一系列主动保护措施，包括过压、过流和短路保护以及温度监控等。辅助电源通过连续实时检查各种参数，确保对异常或问题做出快速反应。这种快速激活的保护机制有效地避免了对PSU及其连接器件的损害，减轻了电气危险，并显著提高了系统的整体安全性。

诊断评估

BBU在向连接的器件供电之前，会定期进行自诊断测试以验证其功能。在此过程中，辅助电源会提供启动和结束诊断程序所需的电压和控制信号。这种自我评估有助于及时检测BBU内的潜在故障，包括器件问题或电压异常。辅助电源的参与有助于通过及早识别和查明故障来增强PSU的性能，并延长其使用寿命。这种主动方法让PSU工作更可靠，准备更充分，确保不间断供电，并大大降低系统发生故障的风险。

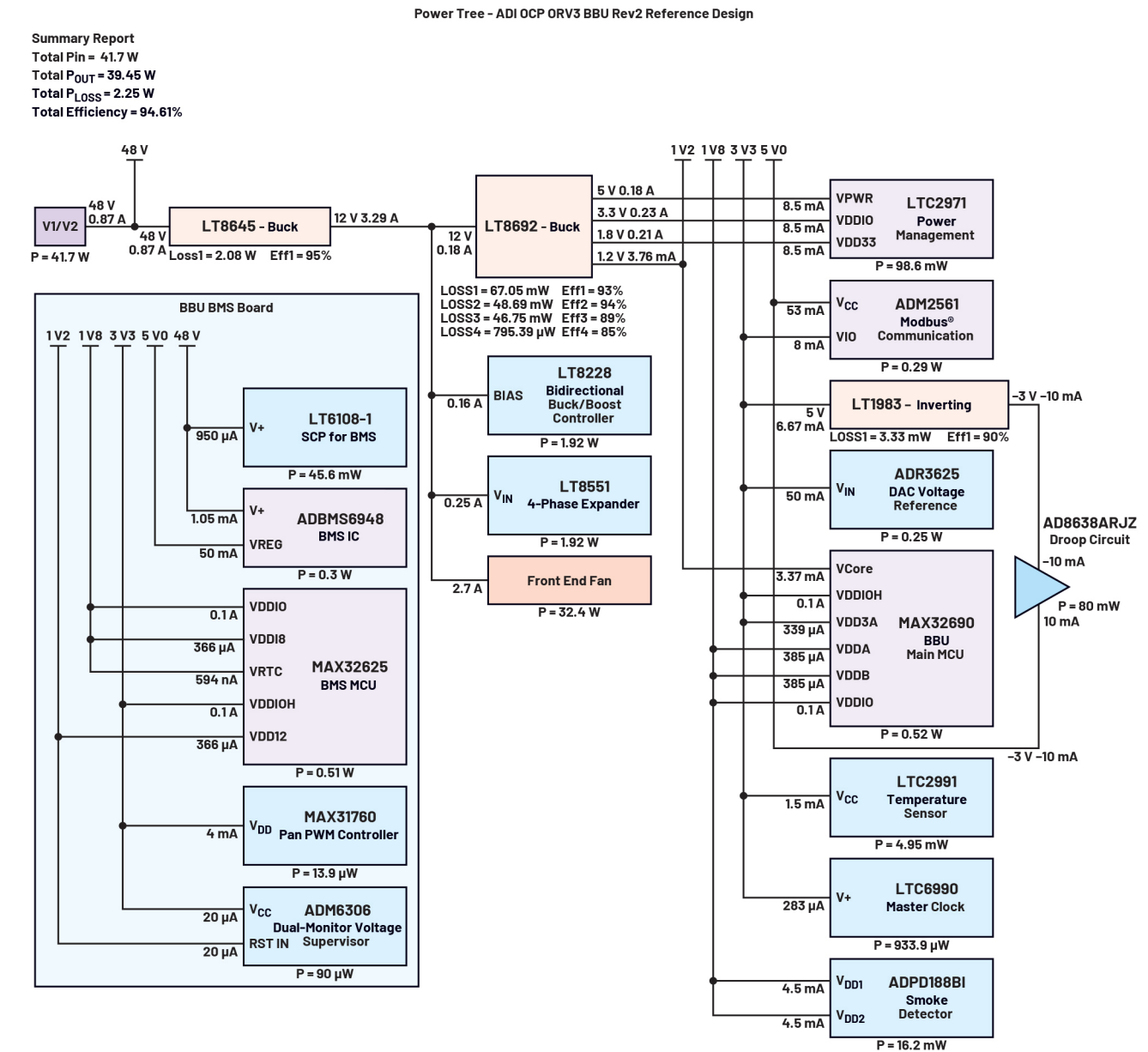


图1. BBU模块在充电和放电过程中的辅助电路设计。

Summary Report
Total Pin = 1.67 W
Total P_{OUT} = 1.03 W
Total P_{LOSS} = 0.64 W
Total Efficiency = 61.48%

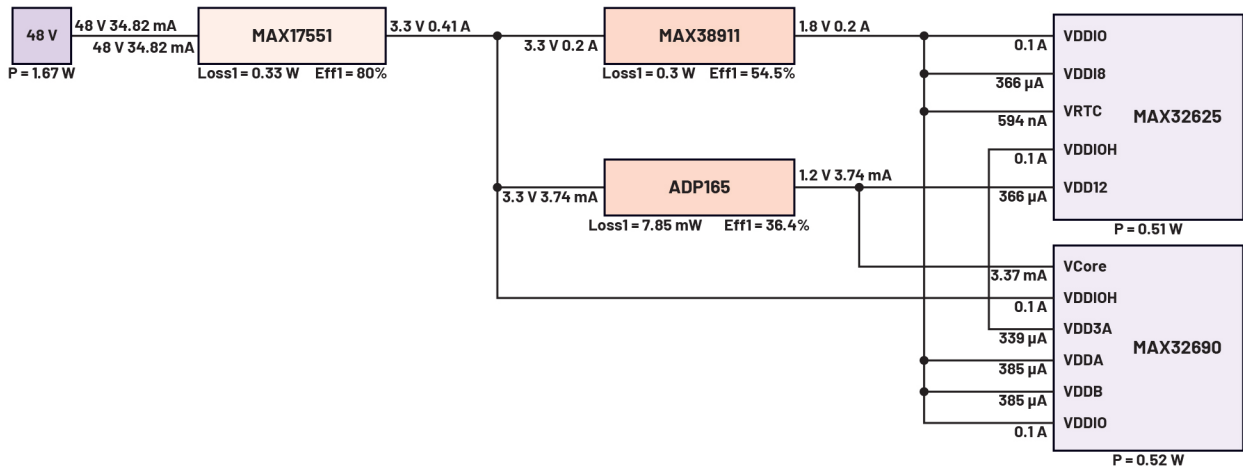


图2. BBU模块在休眠模式下的辅助电路设计。

ADI的电源设计工具LTpowerCAD®提供专为BBU辅助电源设计的定制工程见解和组件性能数据。这种强大的组合成功地加快了复杂的电气评估过程，缩短了原型设计阶段，并大大加速了辅助电源电路的整体开发进程。这会明显减少审查所花费的时间，大幅降低电路设计的复杂性。

图1展示了为优化充电模式或放电模式下BBU运行期间的能量流而设计的辅助电路，其中体现了巨大的工程工作量。图2则显示了BBU休眠模式下的低功耗辅助电路，它采用低压差(LDO)稳压器和单通道降压转换器。

为了给此类电源转换器、微控制器和其他外设供电，BBU模块辅助电路包含表1所列的六个电压轨。

表1. BBU电压轨

充电或放电工作模式	休眠工作模式
▶ 12 V偏置轨	
▶ 5 V、3.3 V、1.8 V和1.2 V偏置轨	▶ 3.3 V、1.8 V和1.2 V偏置轨
▶ -3.0 V偏置轨	

BBU充电或放电工作模式下的辅助电源

12 V偏置轨

LT8645S是一款高压同步降压控制器，具有高达8 A的惊人负载能力。其主要功能是以非常高的精度将48 V背板电压电源高效转换为12 V辅助电压电源。该器件集成了旁路电容，这使其有别于其他高压降压控制器。这一策略性选择不仅可以减小PCB尺寸，而且巧妙地解决了快速电流环路和电磁干扰(EMI)发射等难题。这种组合显著提高了整体效率，增强了控制器优化能耗的能力。

12 V偏置轨为电源转换器、风扇电源和电流共享总线电路等基本组件提供支持。12 V偏置轨充当这些关键组件的主要能源通道，助力系统实现无缝运行和高性能。这些组件在电源下有机结合在一起，其中LT8645在增强效率和功能方面发挥着关键作用。

5 V、3.3 V、1.8 V和1.2 V偏置轨

采用四通道同步降压控制器LT8692S是一个经过深思熟虑的选择，旨在提供多种输出：5 V、3.3 V、1.8 V和1.2 V。这种调整对于适应降低的辅助电压以与较低的总线电压保持一致尤为重要。该控制器在一个以2 MHz频率运行的单一振荡器的引导下，确保其输出的精密度和同步性。

该器件真正的独特之处在于集成了电容，这一特性有效降低了布局对EMI的敏感性，有助于满足严格的EMI性能要求。因此，其与噪声敏感的设置和应用的兼容性显著增强。四通道架构具有高集成度特点，不仅节省空间，而且设计方法更加简洁高效。

为了解释其使用方式，5 V偏置轨为放大器电源轨、Modbus UART驱动器、数字温度传感器和电源管理器件供电。3.3 V、1.8 V和1.2 V输出分别为EEPROM器件、主微控制器单元(MCU)和电池管理系统(BMS) MCU供电。

-3.0 V偏置轨

LTC1983为驱动BBU的运算放大器提供关键的-3 V电源轨，是电荷泵反相器的明智选择。该器件仅需一对附加电容即可支持高达100 mA的输出负载，这证明其固有效率非常高。值得注意的是，这种高效率得益于其微小的外形尺寸，这一设计特性赋予了它独特的优势——在BBU电源板上仅需1mm空间即可发挥作用。

BBU休眠工作模式下的辅助电源

3.3 V、1.8 V和1.2 V偏置轨

MAX17551是一款性能突出的同步降压转换器，可将电池堆的48 V电压转换为稳定的3.3 V输出。此电压充当一个重要通道，在主MCU和BMS MCU处于休眠模式时将电力输送至其数字通用引脚。选择这款降压转换器是因为它具有以下优势：输入电压范围宽广，从4 V到60 V，通用性强；外形小巧，节省空间；运行效率出色，最低功耗不到10 mW。这些特性的融合使其成为提高电池堆整体耐用性和续航能力的优选解决方案。

ADP165 LDO稳压器实现了更为复杂的降压功能，可准确地将电源电压从3.3 V降至1.2 V。这种有针对性的降压可作为主要能源，为主MCU和BMS MCU的核心操作供电。在微控制器电路中巧妙地集成LDO稳压器可以改善电压调节，显著降低噪声，简化设计架构，提高运行效率，并提升可靠性标准。此外，ADP165的功耗不到15 μ W，因此系统能耗大大降低，电池的续航时间显著延长。

最后，为了供应模拟和USB电源电压以及其他一些核心电压，系统采用了MAX38911，它能准确地将电源电压从3.3 V降至1.8 V。此LDO稳压器可以输送高达500 mA的负载电流，足以提供微控制器所需的负载电流。该电源转换器在低功耗模式下消耗约19.2 μ A的电源电流，因而适合休眠工作模式。

鉴于辅助电源在充电或放电操作期间的效率高达94%，而在休眠模式期间的效率为62%，为了保持一致的理想性能，怎么强调响应式热管理的重要性都不为过。为辅助电路选择适当器件的意义不仅仅在于提升普通功能；更关键的是，这构成了在BBU不同工作状态下的设计完整性的基础。借助该策略可以预测整

体功耗，并估算电池的使用寿命。此外，它支持以经济有效的方式改善辅助电路的性能，最终全面提升该单元的整体效率。¹

总结

在本系列的最后一篇文章中，辅助电源被描述为BBU的关键组件，负责协调各种重要功能。其功能涉及许多关键责任，所有这些责任对于BBU的平稳、可靠、安全运行都至关重要。辅助电源作为后备电源，如同保护盾，负责调整电压水平、管理散热风扇电源、采取保护措施以及开展开机自检等。这些操作精妙地相互作用，以提供不间断电源，保护器件，并延长整个系统的寿命。

辅助电源是为模拟和数字器件提供可靠补充电源的关键因素。随着辅助电源技术的进步，数据中心PSU和BBU的效率和安全性不断提升，功耗不断降低，推动创新达到新的高度。我们不断变化的技术世界对电源的需求日益增长，而持续的技术进步是对这种需求的有力回应，不仅塑造了我们的当下，也影响着未来的电气化。

本系列文章的每一篇都是一份全面的资源，提供了准确的指导，帮助设计和应用工程师获得必要的见解，以便基于OCP ORV3 BBU提供的复杂规范构建更智能、更可靠、更具成本效益的解决方案。为此，文中提供了详尽的器件选型流程、周全的操作指南、工程设计方法以及具体的程序性建议。

参考文献

¹David Sun。“开放计算项目开放机架V3 48 BBU 1.3版”。开放计算项目，2022年11月。

作者简介

Christian Cruz是ADI菲律宾公司的应用开发工程师。他拥有菲律宾马尼拉东方大学的电子工程学士学位。他在模拟和数字设计、固件设计和电力电子领域拥有超过12年的工程经验，包括电源管理IC开发以及AC-DC和DC-DC电源转换。他于2020年加入ADI公司，目前负责支持基于云的计算和系统通信应用的电源管理需求。

Ralph Clarenz Matociños毕业于菲律宾马尼拉Pamantasan ng Lungsod ng Maynila (PLM)，获电子工程学士学位。他在模拟和数字设计以及电力电子方面，包括电池管理系统IC开发和DC-DC电源转换方面，拥有超过一年的工程经验和专业知识。

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ez.analog.com/cn

 **ADI EngineerZone™**
中文技术论坛

 **ANALOG
DEVICES**
超越一切可能™

analog.com/cn

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和专业技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

©2025 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。