

Brett Novak
Marketing Manager
C2000™ microcontrollers
Texas Instruments, Houston

采用单微控制器实施开关模式电源的峰值电流模式控制

执行摘要

简介

为了寻求更高效的大功率电源，设计人员将目光转向了以数字化方式实施更大功率的电源系统。本文主要说明在数字域中采用德州仪器（TI）的 C2000™ Piccolo™ 微控制器集成模拟功能的峰值电流模式控制实施，这种实施通常降级为电源控制的外部模拟实施。这种集成不仅减少了外部支持组件的负担，同时还减少软件实施的负担。

峰值电流模式控制对于电源设计人员而言不是新话题，但传统上降级为模拟控制方案。在高级电源系统中，电流模式控制提供许多优势，包括改进负载线路调节、逐周期电流限制与保护，以及更好的磁通量平衡。但是，由于本身的性质，峰值电流模式控制要求斜率补偿，这意味着需要额外的支持电路，因此很难在数字化架构中实施。一直以来，一套完整的数字化控制系统实施起来很困难而且成本昂贵，这种情况直到最近数字信号处理器（DSP）的出现才有所改善，因为这种处理器带有专用于执行相应任务的集成硬件。

如今的微控制器不仅具有更高的精度、更低的功耗，而且成本也更低，广泛适用于各种电源应用，包括：

- 服务器和整流器电源
- 工业电源
- 医疗、军用、高性能消费电源系统

TI 了解开发人员在设计这些高性能电源系统时面临的挑战。制造商寻求引入先进的控制算法以实现产品差异化，而日益增加的政府法规要求更低的功耗和更少的电磁干扰（EMI）。

为了帮助开发人员应对这些多种多样的挑战，TI 提供了 TMS320C2000 Piccolo 微控制器具有优化的架构，集成了专用外设，从而实现了：

- 使用实时算法获得更精确、更准确的控制
- 支持通过单器件控制多个功率级
- 通过外设集成简化设计
- 降低系统复杂性和成本

这些微控制器还具有一个专用的开发人员网络，提供数字电源和可视化编程资源。

Piccolo 的优点

Piccolo 微控制器利用 TI 的高性能 TMS320C28x™ 内核，提供以单一独立控制器控制系统所需的所有性能和外设。通过充足的余量和专用外设，Piccolo 微控制器使开发人员能够实现更先进的控制算法，在进一步提高性能的同时降低系统成本。

Piccolo™ 微控制器架构已针对数字控制应用进行了优化，具有先进的架构特性，增强了高速信号处理能力。Piccolo 的主 CPU 内核具有单周期 32×32 位乘法及累积单元等内置 DSP 功能，大幅度提高了计算速度。此外，诸如模数转换器（ADC）和脉宽调制器（PWM）等控制外设设计得非常灵活，能够轻松适应几乎任何用途，而需要的软件开销极小。例如，ADC 具有自动序列发生器允许开发者进行编程，以循环通过特定次序的样本，这样当应用程序需要时值已就绪。使用更智能的控制外设和强大的 CPU 内核，控制环路运行更紧密，既改进了控制算法的动态特性，又减少了干扰行为。

重要的 Piccolo 微控制器特性包括：

- 40 至 90 MIPS 的处理性能
- 3.3-V 单电源支持全部功能的运行
- 双内部高精度振荡器；无需外部晶体
- 12 位 ADC 具有 16 通道，最大取样频率为每秒 4.6 兆样本
- 多达 19 通道的 PWM 输出，具有可配置自动死区
- 19 个 PWM 通道中有多达 8 个可以在高分辨率模式下工作，其可以低至 150 皮秒
- 集成模拟比较器和斜率补偿参考数模转换器（DAC）直接连接 PWM 输出，以实施峰值电流模式控制功能

采用高性能 PWM 进行精确 和准确控制

由于 Piccolo 微控制器架构提供极佳的处理能力，每秒处理 40 至 90 百万条指令（MIPS），开发人员可以同时监视和控制多个电机，还可以执行更复杂的控制算法，以获得更高的精确度、更流畅的性能和更低的功耗。例如，单个 Piccolo 微控制器具有主动式功率因数校正（PFC）整流器级，还具有充足的处理功能，以实施次级 DC-DC 转换级的峰值电流模式控制（PCMC）。

脉宽调制（PWM）在开关模式电源的控制中发挥重要作用。控制算法的最新改进使开发人员能够实施高度精确的算法，以提供与系统行为实时变化相适应的动态控制。通过利用 Piccolo 微控制器系列器件的高分辨率 PWM 功能（下面的图 1 中显示为 V_o ），系统设计人员目前能够在约 100KHz 开关频率下使用有效的 16 位分辨率 PWM 信号，从而减少占空比限制问题。

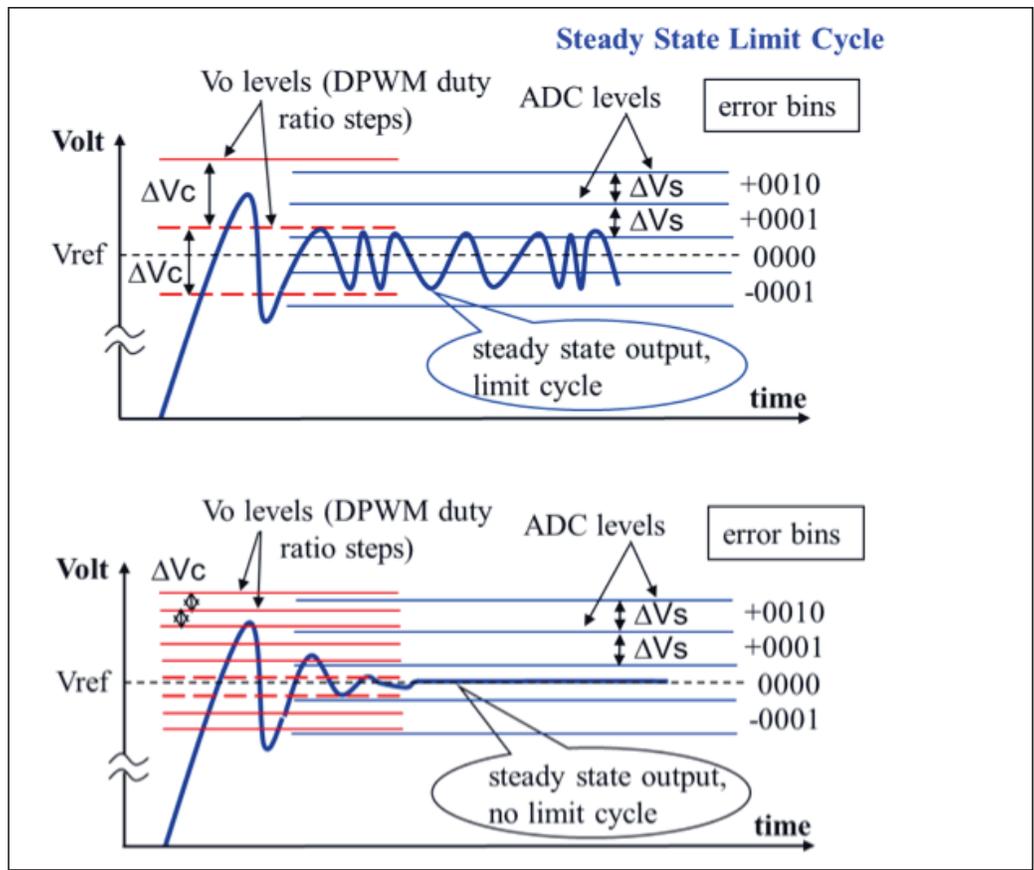


图 1. 低分辨率 PWM 步进（顶部）与高分辨率 PWM 步进的对比

采用高性能
PWM 进行精确
和准确控制

PCMC 的两种实施中，有一个“电站”（我们的实际功率级）和一个控制功能。功率级之外，在模拟域中，还可通过一系列放大器、电阻器、电容器和各种其他必须针对“电站”最佳性能和效率计算的模拟组件实施我们的控制功能。下面的图 2 是指降压稳压器功率级 PCMC 的基本模拟实施。

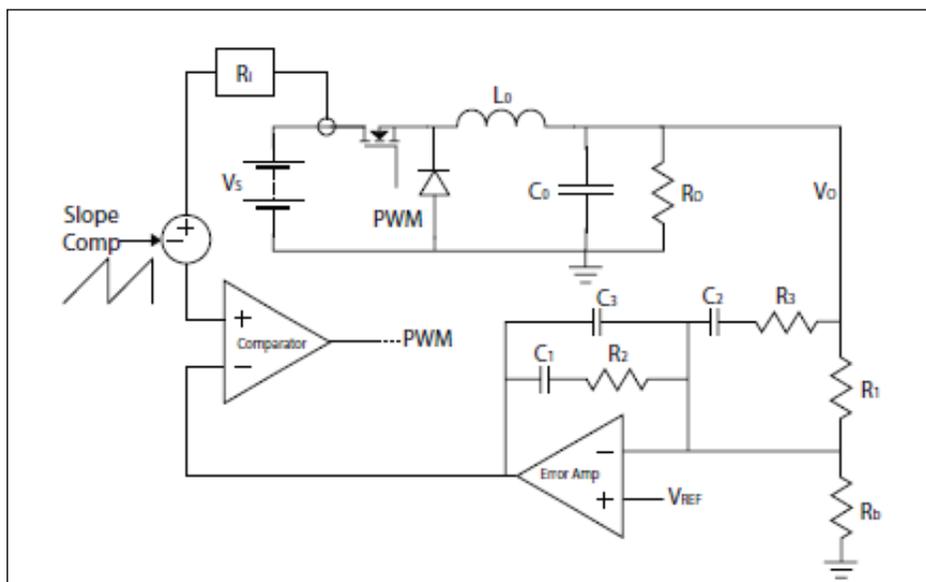


图 2. PCMC 降压转换器的模拟实施

转换到数字控制域时，模拟控制器的所有控制资源在单个微控制器上实施。所有必要模拟组件、ADC、比较器、斜率生成 DAC 和 PWM 输出都集成入单个器件。但是，请注意，实际功率级保持相同。下面的图 3 代表以迅速增长的形式数字化实施微控制器的集成功能。

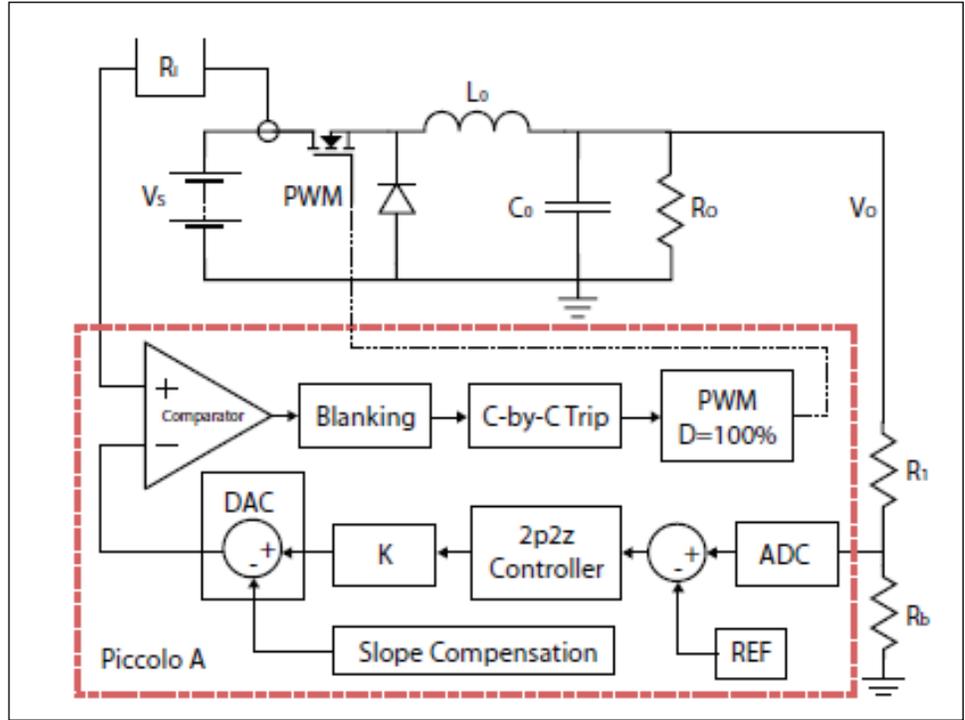


图 3. PCMC 降压转换器的微控制器数字化实施。红框区域表示微控制器中包含的功能。

在单芯片微控制器上实施 PCMC

实施 PCMC 系统时，必须设置电路控制的外部电压模式控制环路。如下面的图表所示，其中指出 ADC 输入、2P2Z 控制环路和最后驱动控制器 PWM 输出之间的关系。

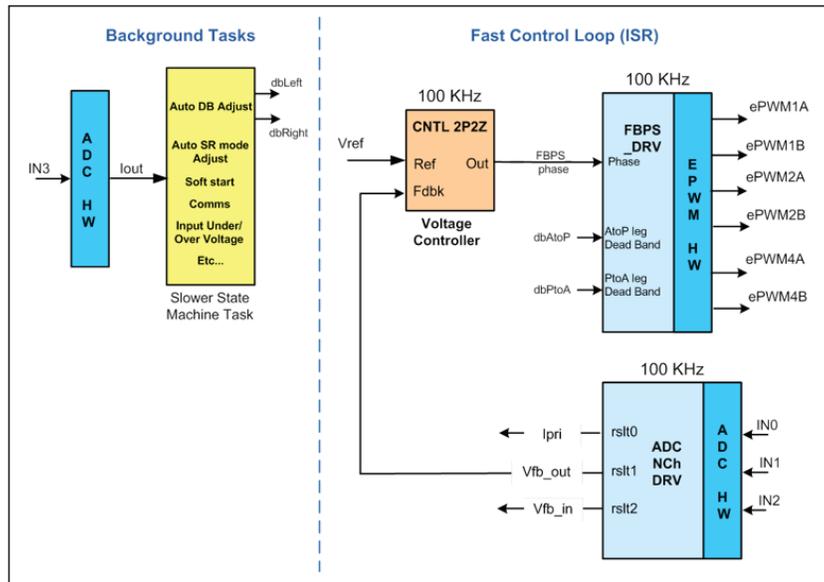


图 4. 实施电压模式控制环路

PCMC 实施目前可以在添加比较器和斜率补偿电路的情况下使用此电压模式控制环路。在 PCMC 实施中，这两个组件创建的内部电流模式控制环路现在可以确定我们的峰值电流参考信号。大部分微控制器可以处理电压模式控制时，添加比较器和斜率补偿 DAC 是 PCMC 的要求，这两者已集成入 Piccolo 微控制器系列。这使 PCMC 控制的设计能够使用较少的外部硬件，同时减少微控制器的处理要求，并且允许以较低的成本实施。使用 Piccolo 微控制器时 PCMC 控制环路的可视化表示和内部硬件连接如下面的图 5 所示。

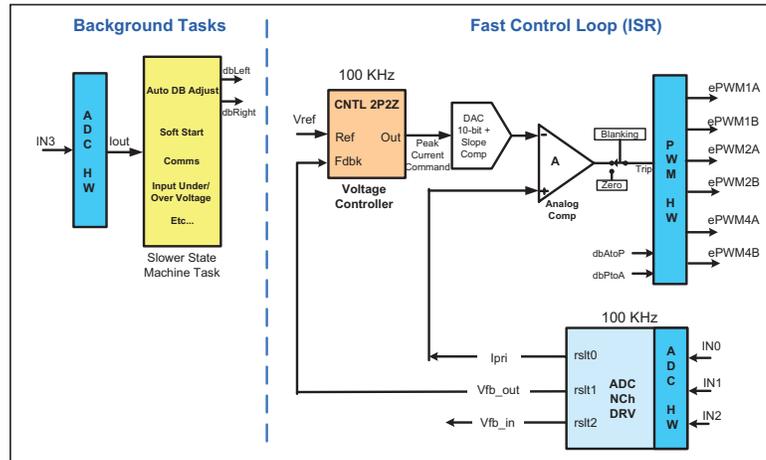


图 5. 实施 PCMC 环路

注意使用相同的 100 Khz 双极点双零点控制回路，但现在将此输出供给 10 位斜率补偿的斜坡 DAC。然后使用内部模拟比较器之一触发 PWM 脉冲，以在适当时间关闭。PCMC 系统中斜率补偿的目的在于限制系统占空比大于 50% 时发生的亚循环振荡。如果没有斜率补偿，这些振荡将导致输出变得不稳定，与正常操作参数偏差较大。在 PCMC 系统中，测量感应器电流“前缘型消隐”也应添加到我们的比较器输入。这是由感应器初始充电中的电流尖峰引起的，可能会引起比较器由于感应到比预期更高的电流而过早跳开。Piccolo 微控制器的比较器模块将此功能作为灵活模块直接集成入其中，以减少可能引起的任何设计问题。图 6 和图 7（下图）显示输出到已感应器电流的 PWM 输出之间的关系，该电流在比较器模块中（有或无）前缘型消隐。

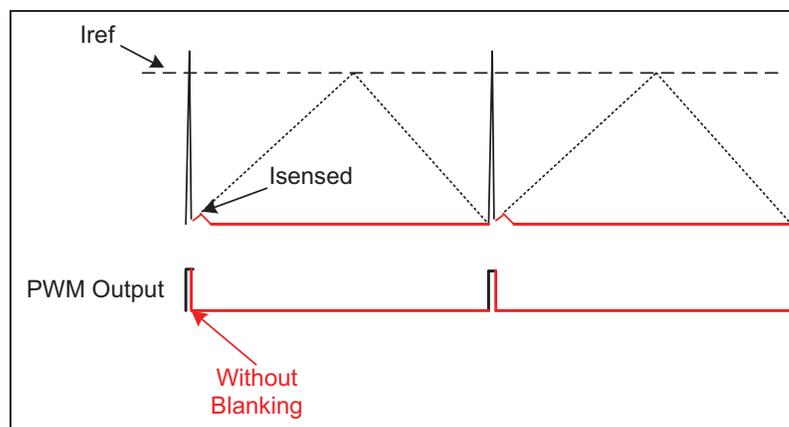


图 6. PWM 输出与无前缘型消隐的已感应器电流的对比。

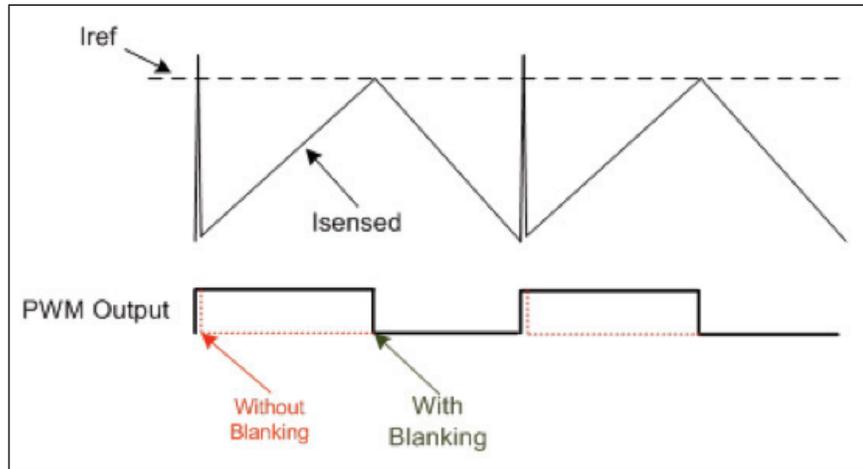


图 7. PWM 输出与启用前缘型消隐的已感应感应器电流的对比。

要完全实施峰值电流模式控制系统，应使用 Piccolo 微控制器的 RAMP DAC 功能，并在微控制器内轻松实施。经过适当的系统调优，RAMP DAC 功能设置为向比较器提供与增强 V_{in+} 信号相符的降低电压信号 (V_{ref})。反过来，这可控制比较器跳闸频率的关闭跳闸点，及 PWM 生成装置的相应关闭。如下面的图 8 所示，这是一个 VisSim 建模和模拟图表。（Visual Solutions 提供的软件）

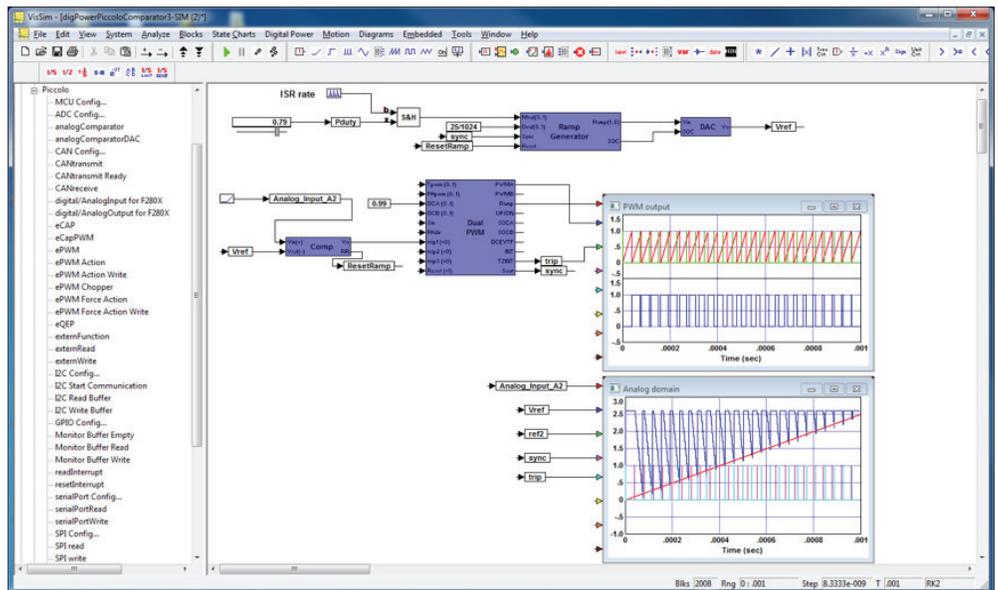


图 8. VisSim 中的 PCMC 模拟

新手上路

TI 为数不胜数的应用程序提供大量开发硬件，包括有助于 PCMC 实施的硬件。全桥开发套件 TMDSHVPSFBKIT 是整套高电压相移全桥系统的代表，同时具有电压模式控制和峰值电流模式控制选项，具有易于使用的 GUI 界面来设置不同的参数。该套件设有 400VDC 输入、12VDC 输出，且额定功率高达 600 瓦。这是隔离拓扑，使用隔离边界次级（输出）侧上的 Piccolo F28027 微控制器。TI controlSUITE 软件系统还为相移全桥套件的峰值电流模式控制功能提供硬件原理图和实施软件。图 9 显示评估套件的方框图和装置图像。

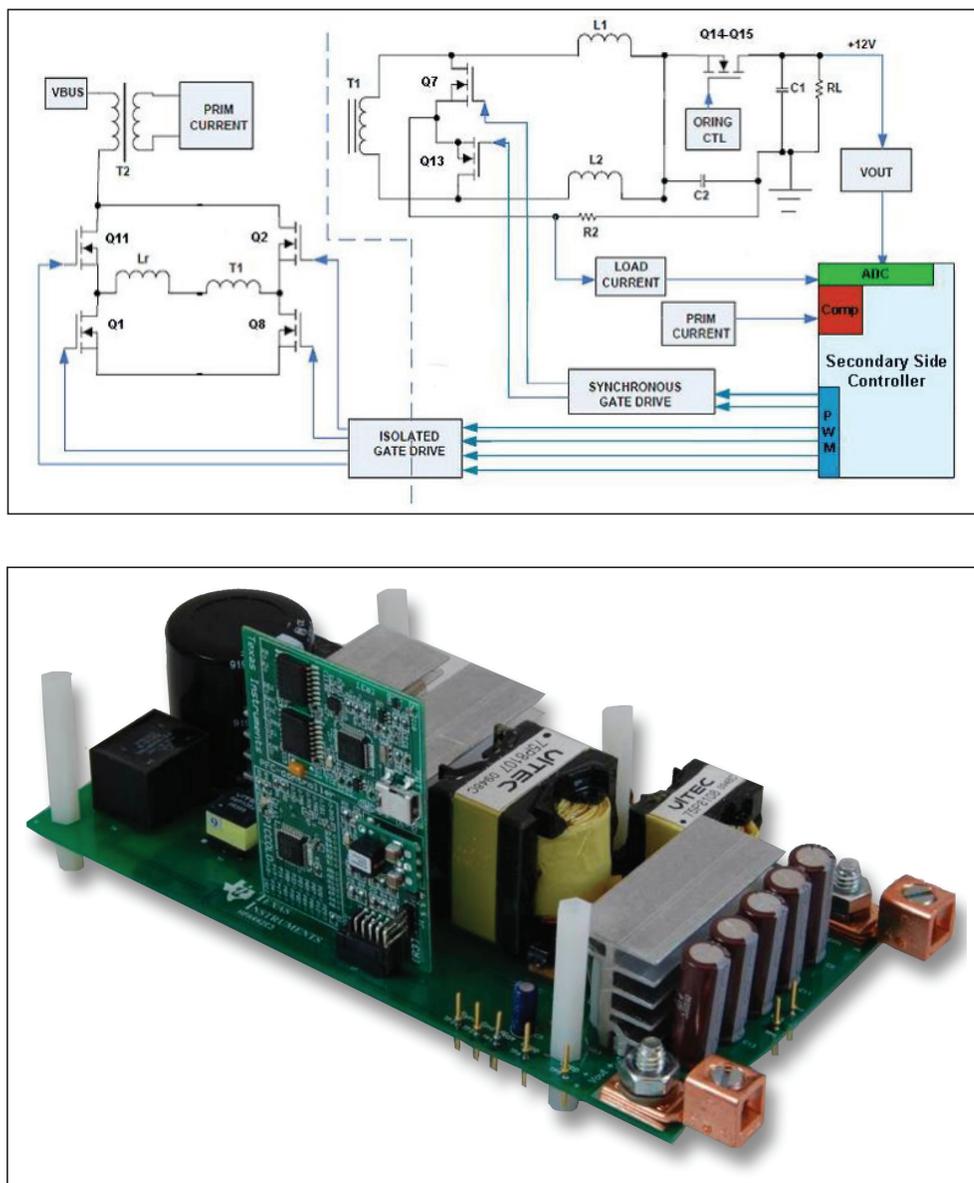


图 9. TMDSHVPSFBKIT 方框图和 TMDSHVPSFBKIT 图像

对于指望在其他电源设计上实施 PCMC 的开发人员，TI 还提供了易于使用的名为 C2000 LaunchPad 的 C2000 开发工具。这是一个仅需 \$17 的低成本评估套件，包含一个 Piccolo F28027 微控制器和一对通入器件外设的破孔引脚。该评估板还包含一个 USB 至 JTAG 的内置独立编程界面，以便在与高电压设计一同使用时为用户 PC 提供保护。相移全桥套件的 PCMC 控制代码与此评估工具兼容，但将要求修改和调优，以便与自定义电源配合使用。

对于对开发其他数字化控制电源感兴趣的开发人员，TI 基于 Piccolo 微控制器的高电压数字电源开发者套件旨在为开发人员提供一个强大的平台来加速复杂数字电源系统的开发和故障排除。这些套件包括：

- 带 PCMC 的相移全桥 - TMDSHVPSFBKIT (如上所述)
- 谐振 LLC 开发者套件 - TMDSHVRESLLCKIT
- 无桥功率因数校正套件 - TMDSHVBLPFCKIT
- 交错功率因数校正套件 - TMDSHVPFCKIT

可用数字电源套件可以直接使用 Piccolo™ 微控制器架构所有的增强功能和特性。大量软件库和详尽文档为开发人员在使用实时算法创建完整数字电源系统的整个过程中提供指导。这些套件也使开发人员能够快速确定实施电源控制所需的处理资源。根据此基线，他们能够引入高级算法，以权衡获得更高精确度、更高性能、更高功效、多个功率级控制和大量其他选项的剩余处理能力。因此，开发人员可以构造专门针对其应用限制和要求优化的系统。

C2000 Piccolo 微控制器在广泛配置路线图中可用，以确保开发人员能够找到针对其应用程序性能、内存和外设优化的处理器。TI 也提供了电压和电流感应所需的所有模拟组件，以及广泛范围的标准和高级 MOSFET 与 GaN 驱动器。有关 TI 数字电源开发套件、技术应用手册和编程资源的更多信息，请访问 www.ti.com/controlsuite

有关 Visual Solutions VisSim 图形建模、模拟和编程软件的更多信息，请访问 www.vissim.com。

有关实施峰值电流模式控制的更多阅读信息，请参阅这些技术应用手册：
数字峰值电流模式控制的分步设计指南：单芯片解决方案
Ali Shirsavar 博士

具有斜率补偿的数字峰值电流模式控制，使用 TMS320F2803x
Ali Shirsavar 博士和 Richard Poley

Important Notice: The products and services of Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries described herein are sold subject to TI's standard terms and conditions of sale. Customers are advised to obtain the most current and complete information about TI products and services before placing orders. TI assumes no liability for applications assistance, customer's applications or product designs, software performance, or infringement of patents. The publication of information regarding any other company's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合TI 标准保修的适用规范。仅在TI 保证的范围内, 且TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于TI 的产品手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

TI 产品未获得用于关键的安全应用中的授权, 例如生命支持应用(在该类应用中一旦TI 产品故障将预计造成重大的人员伤亡), 除非各方官员已经达成了专门管控此类使用的协议。购买者的购买行为即表示, 他们具备有关其应用安全以及规章衍生所需的所有专业技术和知识, 并且认可和同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由TI 提供, 但他们将独力负责满足在关键安全应用中使用其产品及TI 产品所需的所有法律、法规和安全相关要求。此外, 购买者必须全额赔偿因在此类关键安全应用中使用TI 产品而对TI 及其代表造成的损失。

TI 产品并非设计或专门用于军事/航空应用, 以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品属于“军用”或“增强型塑料”产品。只有TI 指定的军用产品才满足军用规格。购买者认可并同意, 对TI 未指定军用的产品进行军事方面的应用, 风险由购买者单独承担, 并且独力负责在此类相关使用中满足所有法律和法规要求。

TI 产品并非设计或专门用于汽车应用以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品符合ISO/TS 16949 要求。购买者认可并同意, 如果他们在汽车应用中使用任何未被指定的产品, TI 对未能满足应用所需要求不承担任何责任。

可访问以下URL 地址以获取有关其它TI 产品和应用解决方案的信息:

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP 机动性处理器	www.ti.com/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity		
	德州仪器在线技术支持社区		www.deyisupport.com

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122
Copyright © 2012 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司