

# 交叉式升压PFC数字电流平衡

作者: Bosheng Sun, 德州仪器 (TI) 系统工程师

## 引言

功率因数校正转换器让输入电流追随输入电压, 这样, 负载就好像是一个连接为其供电的电压源的电阻器。有源PFC中使用的最为普遍的电源拓扑是非隔离式升压转换器。就高功率级而言, 两个升压单元可连接同一个桥整流器, 并工作在 $180^\circ$  异相下 (图1)。这被称作双相交叉式PFC。通过控制两个相位的电感电流 $180^\circ$  异相, 可同时降低输入和输出电流纹波。结果, 我们便可以使用更小的电磁干扰滤波器, 从而降低材料成本。由于两个升压电路中所使用的两套组件之间的差异, 两个电感电流必然不同。当PFC进入连续导电模式 (CCM) 时, 这种情况更甚。失衡电流在一个相引起更多热应力, 并且它还可能会误触发过电流保护。因此, 对于交叉式PFC设计而言, 电流平衡机制非常必要1-4。

本文为你介绍平衡电感电流的三种不同数字控制方

法。第一种方法检测每个开关周期的电感电流, 比较两个相位之间的电流差异, 然后逐周期调节一个相位的占空比。第二种方法仅对每半个AC周期的占空比进行调节。第三种方法使用两个独立电流环路, 单独控制每个相位。由于这些环路共用相同的电流基准, 因此电流被自动平衡。

## 方法1: 逐周期占空比调节

在这种方法中, 使用一个分流器检测总电流。一个平均电流模式控制用于强制输入电流追随输入电压。脉宽调制 (PWM) 控制器产生两个信号, 每个信号都有相同的占空比但异相 $180^\circ$ , 用以驱动两个升压级。在每个相位, 电流变压器 (CT) 放置于MOSFET正上方, 以检测开关电流。对CT输出采样, 然后相互比较; 之后, 误差乘以增益K, 倍增输出用于相应调节相位2的占空比。例如, 如果相位1具有比相位2更高的电流, 则误差为正。倍增器输出 (同样为正) 增加相位2的占空比及其电流。图2显示了这种配置。

图1 双相交叉式PFC

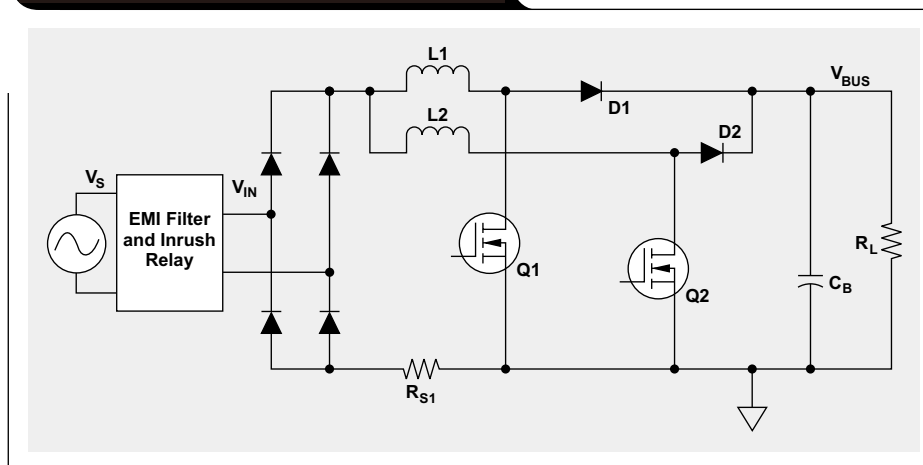
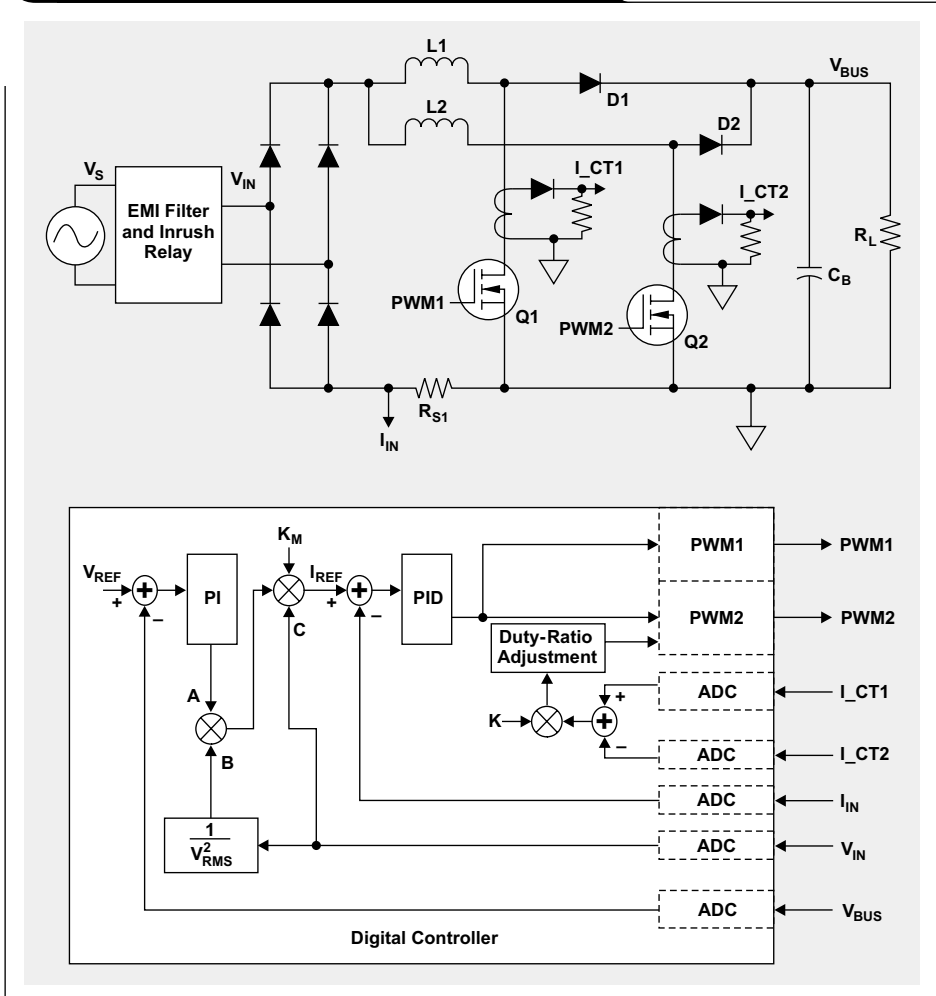


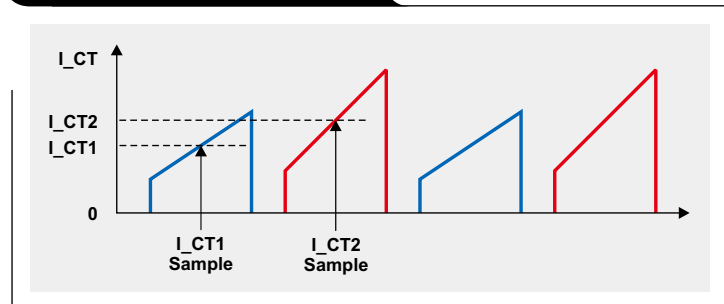
图2 逐周期占空比调节



正确对CT电流采样是这种方法的关键所在。由于CT输出为锯齿波，因此为公平比较，需在相同点对两个电流采样。例如，在开关“导通”时间的中间位置进行采样，如图3所示。此处，失衡电流引起不同的CT输出大小。

正确CT电流采样以后，逐周期方法便可获得良好的电流平衡。图4显示了360W、数字控制交叉式PFC的测试结果。正如我们看到的那样，电感电流之间存在巨大的差异，但在平衡以后它们几乎重叠在一起。

图3 CT信号采样



由于在每个开关周期都对第二个相位占空比进行调节，并且由于各个周期之间的电流差异不同，每个周期的调节可能也不同，因此这种方法必然会给AC输入电流带来高频噪声。图5a显示了电流平衡变得平滑且干净以前的AC输入电流波形。一旦使用了电流平衡，高频噪声便会消失（图5b）。

### 方法2：半AC周期占空比调节

由于在每个开关周期都对占空比进行调节会给总输入电流带来高频噪声，因此尝试仅在每个半AC周期对占空比进行调节看似为一种合理的办法。每个半AC周期的平均

或者峰值电感电流均可用于电流平衡。例如，利用与图2所示类似的配置，强制每个半AC周期的峰值电感电流均相等。仍然在每个开关周期对 $I_{CT1}$ 和 $I_{CT2}$ 采样，并且固件在每个半AC周期发现 $I_{CT1}$ 和 $I_{CT2}$ 的峰值。然后，比较这些峰值，并且使用误差来调节占空比。在每个半AC周期计算电流差异一次，因此相同的占空比调节运用于下一个半AC周期。这样，便从根本上解决了高频噪声问题。测试结果表明，AC电流波形几乎与使用电流平衡以前一样；高频噪声消失了。

图4 电感电流

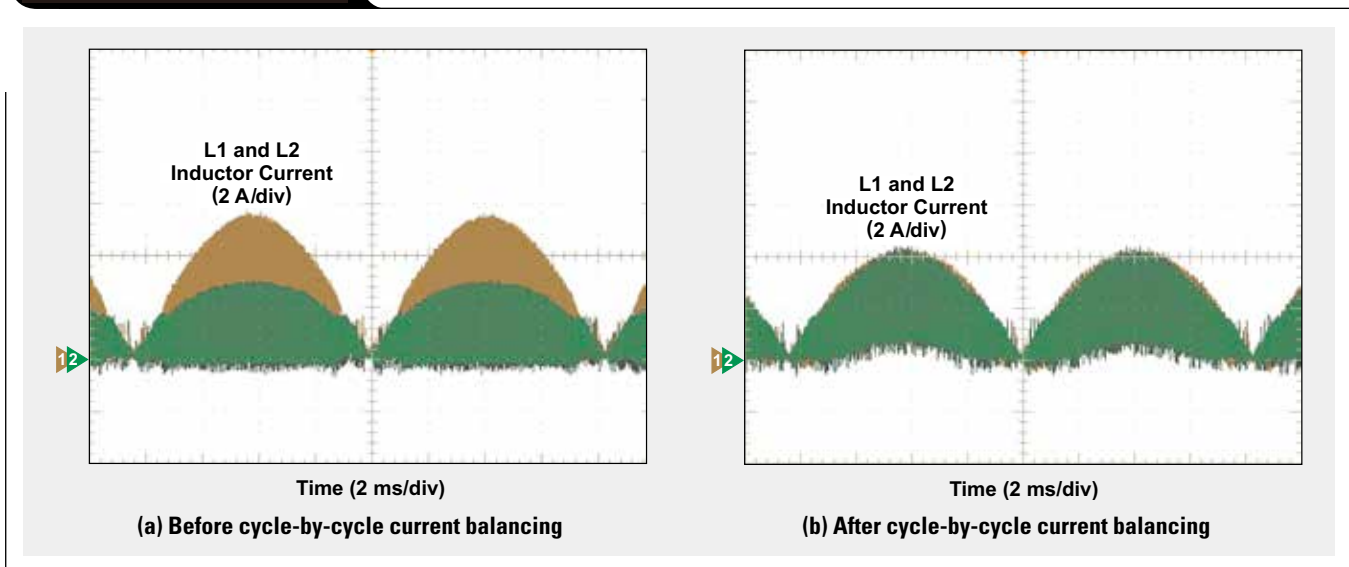
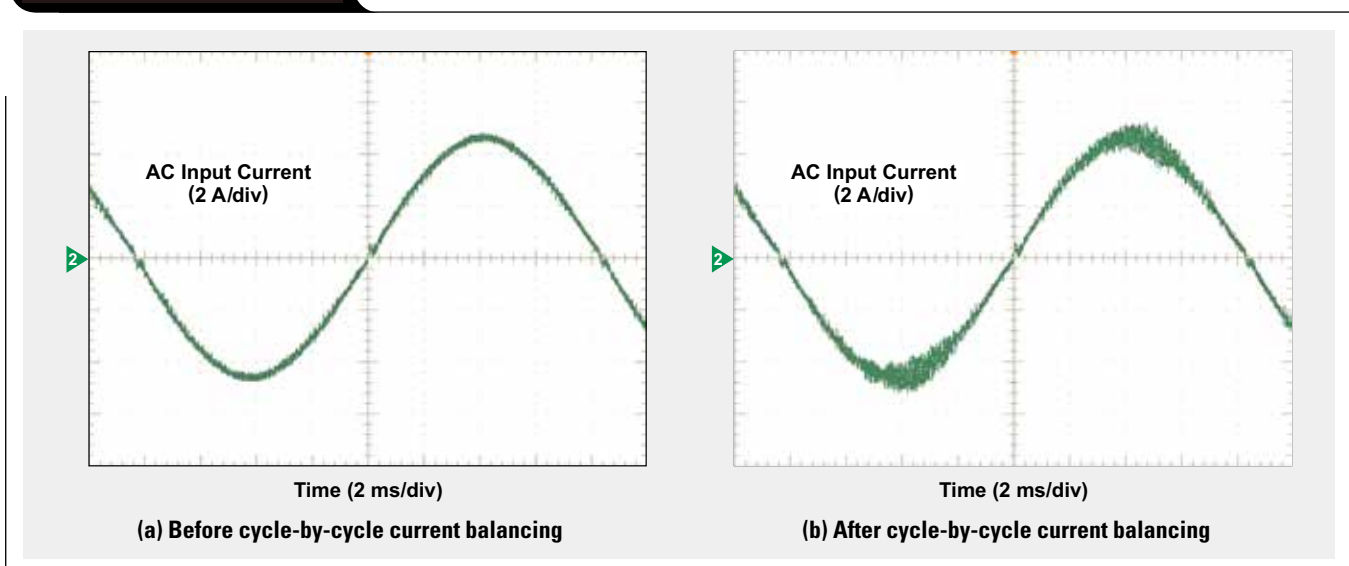


图5 AC输入电流



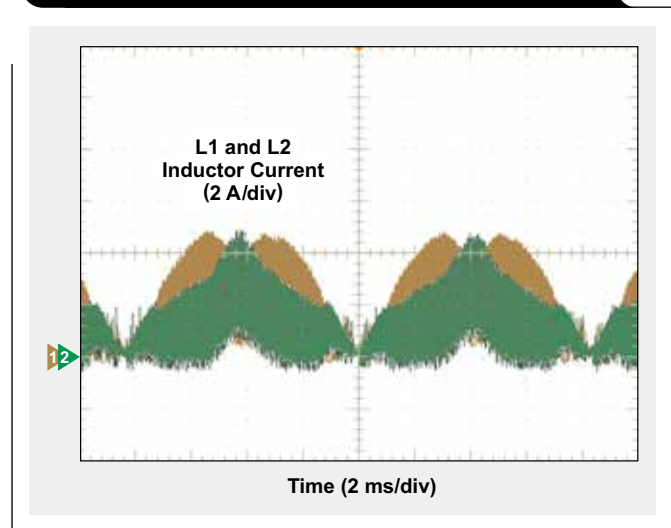
另外，这种方法也有一个缺点。由于连续导电模式（CCM）和非连续导电模式（DCM）下，占空比与输入电流传输函数的关系不同，因此转换器动态可能会突然变化。即使总输入电流仍然为正弦曲线，但在半AC周期使用相同的占空比调节会使电感电流失真（图6）。另外，由于两个升压电路中使用的两套组件之间存在差异，电路在每个半AC周期的不同点进入CCM。所以，两个相位的失真情况也不一样。另一方面，与图4a所示失衡电流不同，这种方法会强制每个半AC周期的电感电流峰值相等，因此电流确实一定程度上实现了平衡。

### 方法3：双电流控制环路

在前面的一些方法中，都仅有一个电流控制环路。总电流用于电流环路控制，而两相位从相同控制环路获得相同的占空比。如果使用相同电流基准的两个电流控制环路，并且每个单独控制一个相位，则闭环控制会强迫电流自动平衡，从而使占空比调节变得无必要。

就模拟控制器而言，再添加一个环路意味着添加另一个补偿网络和另一个反馈引脚。不可避免的是，它会增加成本和设计工作量。利用一个普通数字控制器，通过固件实现这种电流控制环路。增加第二环路意味着增加额外的代码，乍看好像是一种好的解决方案。但是，额外代码需要额外的CPU执行时间。仅用于一个环路计算的CPU，现在需要服务于两个环路。要想在不导致任何中断溢出的情况下完成这项工作，就需要提高CPU速度。它要求更高成本的CPU，并且功耗也随之增加。另一种选择是降低控制环路速度—例如，从50kHz降低到25kHz。CPU速度保持不变，并且在不导致任何中断溢出的情况下完成双环路计算。然

图6 半AC周期电流平衡以后的电感电流

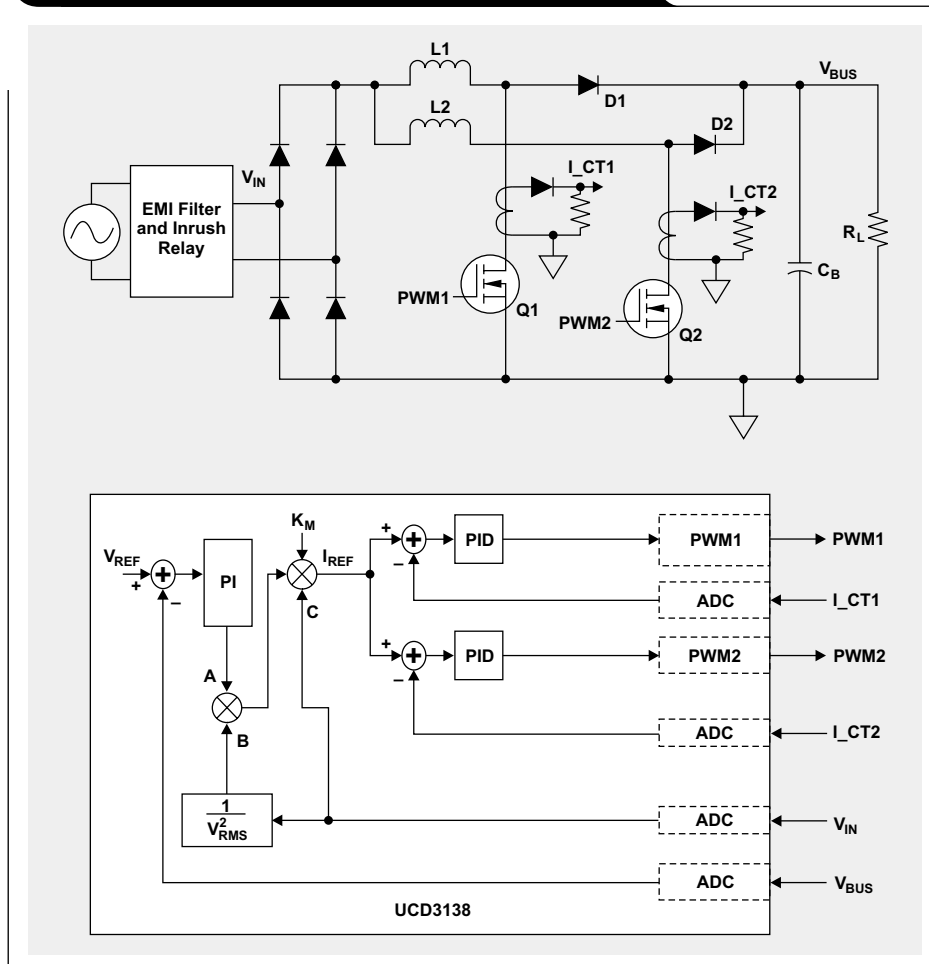


而，由于控制环路速度降低，环路带宽便受到限制，而低带宽又会降低PFC性能。

### 集成控制解决方案

第二代数字控制器，例如：TI UCD3138等，为我们提供了一种不一样的解决方案。它是一种完全可编程数字控制器，但控制环路通过固件实现。这种控制环路基于比例积分导数（PID），是一种双极、双零数字补偿器。所有环路计算均由固件完成，并且速度可达2MHz。固件只需对PID系数进行配置。它允许使用一颗低速CPU，因为其只需完成低速任务，例如：内务处理和通信等。另外，UCD3138在芯片内拥有3个独立的环路，因此可以在没有使用任何额外硬件或者高速CPU的情况下，实现双电流控制环路。图7显示了使用UCD3138实现的这些双控制环路的配置情况。需对每个相位的电流反馈信号进行测量。正常情况下，可以

图7 使用UCD3138的双电流控制环路



使用放置于MOSFET上方的CT。由于不需要分流器，因此这种配置还可提高效率。

因为CT放置于每个开关的正上方（图7），所以它仅检测开关电流。它只是电感电流的上升部分，然而每个电流环路都控制平均电感电流。仍然在PWM“导通”时间的中间位置，对CT电流信号进行采样（图3）。它是一个瞬间值，在图8和图9中表示为 $I_{SENSE}$ 。仅当电流连续时，采样的开关电流（ $I_{SENSE}$ ）才等于平均PFC电感电流（图8）。当电流变得不连续时（图9）， $I_{SENSE}$ 不再等于平均PFC电感电流。为了控制平均电感电流，需推导出采样 $I_{SENSE}$ 的中间点与开关期间的平均电感电流之间的关系，并同时适用于CCM和DCM。

图8 CCM的检测电流波形

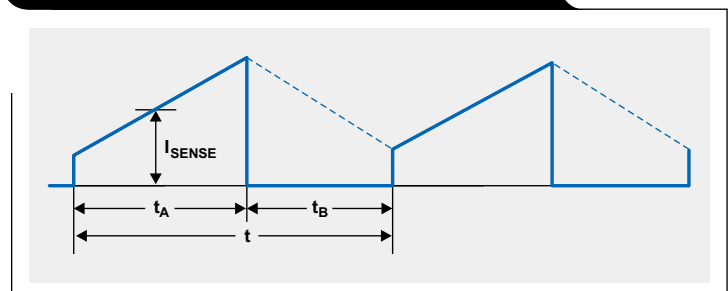
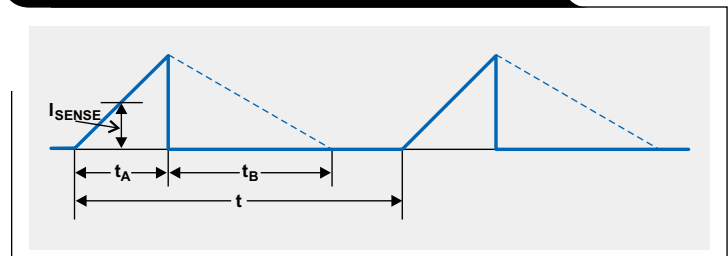


图9 DCM的检测电流波形



对于稳态运行的升压型转换器来说，升压电感的伏秒在每个开关期间均保持平衡：

$$t_{\text{ON}} \times V_{\text{IN}} = t_{\text{OFF}} \times (V_{\text{OUT}} - V_{\text{IN}}), \quad (1)$$

其中， $t_{\text{A}}$ 为电流升时间（PWM“导通”时间）， $t_{\text{B}}$ 为电流降时间（PWM“关断”时间）， $V_{\text{IN}}$ 为输入电压，而 $V_{\text{OUT}}$ 为输出电压，并假设所有功率器件均为理想状况。由图8和图9，可根据 $I_{\text{SENSE}}$ 计算出平均电感电流（ $I_{\text{AVE}}$ ）：

$$I_{\text{AVE}} = I_{\text{SENSE}} \times \frac{t_{\text{A}} + t_{\text{B}}}{t}, \quad (2)$$

其中， $t$ 为开关时间。组合方程式1和2得到：

$$I_{\text{SENSE}} = \frac{I_{\text{AVE}} \times t \times (V_{\text{OUT}} - V_{\text{IN}})}{t_{\text{A}} \times V_{\text{OUT}}}, \quad (3)$$

利用方程式3，我们可以通过瞬时开关电流（ $I_{\text{SENSE}}$ ）解释平均电感电流（ $I_{\text{AVE}}$ ）。 $I_{\text{AVE}}$ 为期望电流，而 $I_{\text{SENSE}}$ 为电流控制环路的电流基准。检测出真实瞬时开关电流，然后与该基准比较，最后将误差发送至电流控制环路。

图10显示了这种方法的测试结果。如图4所示，即使两个电感电流具有较宽的方差，在使用电流平衡以后它们也能几乎完全重叠。同时，总AC电流保持平顺和干净。

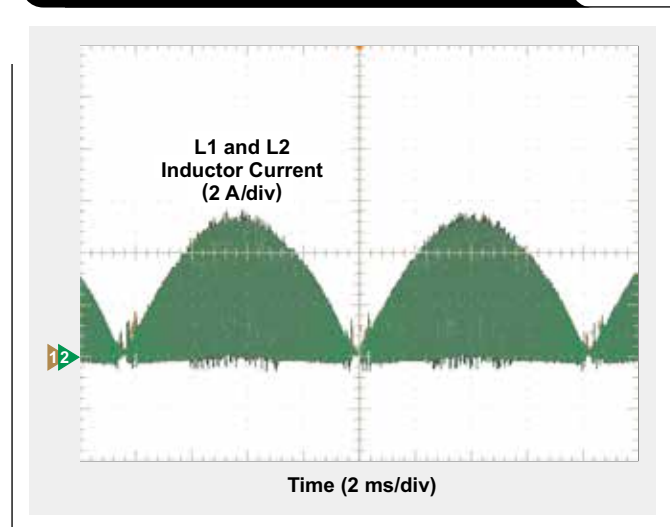
## 结论

我们对交叉式升压PFC使用的三种电感电流平衡数字控制方法进行了评估。通过比较电流差异和逐周期调节占空比，可以非常好地平衡电流。但是，这种方法还给总输入电流注入了高频噪声。每个半AC周期仅调节一次占空比消除了高频噪声，但即使总AC电流为正弦曲线，每个单独电感电流还是失真。更好的方法是使用两个电流环路，每个环路单独控制一个相。由于两个电流环路共用相同的电流基准，因此电流被自动平衡。利用一个数字控制器，第二环路的成本仅为一些额外的代码。测试结果表明，第三方法获得了最佳的性能。

## 参考文献

1、《交叉式升压转换器的一种新型电流共用技术》，作者Byung-Sun Min、Nam-ju Park和 Dong-seok Seok Hyun，见于美国佛罗里达州奥兰多“2007IEEE电源电子专家大会会议记录” pp. 2658–2663。

图10 UCD3138双控制环路的电感电流平衡



2、《一种新的数字控制交叉式PFC电流平衡方法》，作者Marco Soldano等人，见于美国佛罗里达州奥兰多“2012应用电源电子大会与展览会议记录” pp. 299–303。

3、《连续电感电流模式下交叉式升压转换器的功率因数校正》，作者Laszlo Balogh和Richard Redl，见于美国加利福尼亚州圣地亚哥“1993 IEEE应用电源电子大会与展览会议记录” pp. 168–174。

4、《并联升压PFC电路控制电流共用方法和装置》，作者Q. Zhang、A. Qiu、J. Ying和J. Zeng，见于2006年10月3日“美国专利7116087”。

5、《连续和非连续导电模式下工作的数控升压功率因数校正转换器》，见于2005年2月《IEEE工业电子学报》第1册第52卷pp. 88–97

## 相关网站

电源管理：

[www.ti.com/power-aaj](http://www.ti.com/power-aaj)

[www.ti.com/ucd3138-aaj](http://www.ti.com/ucd3138-aaj)

订阅《模拟应用杂志》，请访问：

[www.ti.com/subscribe-aaj](http://www.ti.com/subscribe-aaj)



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。  
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。  
电源在线培训课程

[www.ti.com.cn/webench](http://www.ti.com.cn/webench)  
[www.ti.com.cn/powerlab](http://www.ti.com.cn/powerlab)  
[www.ti.com.cn/powertraining](http://www.ti.com.cn/powertraining)

**WEBENCH® Designer**

Power | **FPGA/μP** | Sensors | LED

Enter your power supply requirements:

Min	14.0 V	Max	22.0 V
Vin			
Vout	3.3 V	Iout	2.0 A
Output			
Ambient Temp			30 °C

Multiple Loads | Single Output

**Power Architect** | **Start Design**

**WEBENCH® Designer** My Designs

最小	14.0 V	最大	22.0 V
输入电压			
输出	3.3 V	输出电流	2.0 A
环境温度			30 °C

**SIMPLE SWITCHER®**  
开始设计 ▶



从通讯、计算机、消费类电子到汽车、工业, 从能源、医疗到安防、航空航天, TI推出一系列创新、完整、独特的制胜解决方案, 给您带来前所未有的技术支持体验。 <http://www.ti.com.cn/www/more/>



德州仪器在线技术支持社区

[www.deyisupport.com](http://www.deyisupport.com)

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



[e.weibo.com/tisemi](http://e.weibo.com/tisemi)

热门产品

- |           |  |
|-----------|--|
| TPS92075  | 具有自适应基准的非隔离式、相位可调光、降压 PFC LED 驱动器              |
| BQ24195   | 具有 5.1V 1A/2.1A 同步升压运行的由 I2C 控制的 2.5A/4.5A 单电池 |
| LM3447    | 相位调光、初级侧电源调整的准谐振反激式控制器                         |
| LM34917   | 具有智能电流限制的超小型 33V、1.25A 恒准时降压开关稳压器              |
| ADS1298   | 具有集成 ECG 前端的 8 通道 24 位模数转换器                    |
| SN65HVD82 | 针对要求严格的工业类应用的稳健耐用的驱动器和发送器                      |
| LM22670   | 具有同步或可调节开关频率的 3A SIMPLE SWITCHER、降压电压稳压器       |
| ISO1050   | 电镀隔离的隔离式 CAN 收发器                               |

了解更多, 请搜索以下产品型号:

TPS92075



## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 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, 并有权根据 JESD48 最新标准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 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。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。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件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 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权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中 TI 信息的重要部分, 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。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 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与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

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

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 © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司