

## 降压式电路的缓冲电路原理和快速设计

Zhengxing Li

Gavin Wang

Sales and Marketing/East China

Application/SVA

### 摘要

本应用报告首先给出了降压式开关电路（buck）在上管开通瞬间的一个等效谐振回路模型。根据该模型推导出使得开关振铃最小化的阻容缓冲电路（snubber）的参数计算公式，并结合参数公式给出了一套 snubber 电路的快速设计方法，最后以 LM5119 的 EVM 为例给出了 snubber 的设计过程和结果。

### Contents

<b>1</b>	<b>Buck 电路中 snubber 的引入和参数优化</b>	<b>2</b>
1.1	Snubber 电路的引入	2
1.2	包含寄生参数的振铃回路等效	2
1.3	等效模型下的 snubber 参数计算	3
<b>2</b>	<b>一种实用快捷的 snubber 设计方法</b>	<b>6</b>
2.1	设计步骤	6
2.2	LM5119 EVM 缓冲电路设计实例	7
	参考文献	9

### Figures

<b>Figure 1.</b>	<b>常见的 buck 开关波形</b>	<b>2</b>
<b>Figure 2.</b>	<b>包括了主要寄生参数的 buck 电路模型</b>	<b>3</b>
<b>Figure 3.</b>	<b>上管振铃电路等效模型</b>	<b>3</b>
<b>Figure 4.</b>	<b>不同电阻值下对振铃的抑制效果对比</b>	<b>4</b>
<b>Figure 5.</b>	<b>相同电阻值下电容值变大对振铃的影响</b>	<b>5</b>
<b>Figure 6.</b>	<b>上管开通瞬间关键节点波形</b>	<b>6</b>
<b>Figure 7.</b>	<b>BOOT charging circuit</b>	<b>6</b>
<b>Figure 8.</b>	<b>LM5119 EVM 原始的振铃波形</b>	<b>8</b>
<b>Figure 9.</b>	<b>LM5119 EVM 在 SW 对地增加 220pF 后的振铃波形</b>	<b>8</b>
<b>Figure 10.</b>	<b>LM5119 EVM 在采用了 2.2Ohm+3.3nF 缓冲电路后的振铃波形</b>	<b>9</b>

## 1 Buck 电路中 snubber 的引入和参数计算

### 1.1 Snubber 电路的引入

由于寄生参数的存在，开关电源电路在开关动作瞬间会产生开关振铃。Figure 1 为 buck 电路开关节点（两个开关与电感交汇点）的典型波形，可见在上管开通瞬间都有不同程度的振铃。振铃的存在，可能使得开关管承受的电压超过其耐压值而发生击穿；另一方面，开关振铃为远超开关频率的高频振铃，并伴随很高的  $dV/dt$ ，会带来传导和辐射的 EMI 问题，可能会使得终端产品不能通过 EMI 标准测试，更严重时甚至会干扰开关电源自身的信号电路或临近的其他功能电路的正常工作。所以尽可能地抑制开关振铃是开关电源设计中一个很重要的环节。常见的措施，包括布线的优化减小线路寄生参数；选用二极管反向特性好的器件；降低开关速度；在振铃回路中放置 snubber 等。其中，snubber 是最为常用的手段，特别是在以上其他措施因客观因素的限制而不能达到最佳效果时。Snubber 不仅能改变振铃频率，同时其电容效应会降低开关节点的  $dV/dt$ ，从而有效抑制 EMI。本文以 LM5119 为实例讨论 buck 电路的 snubber 的相关问题，但同样的设计思路和方法可以推导到其他非隔离拓扑中。

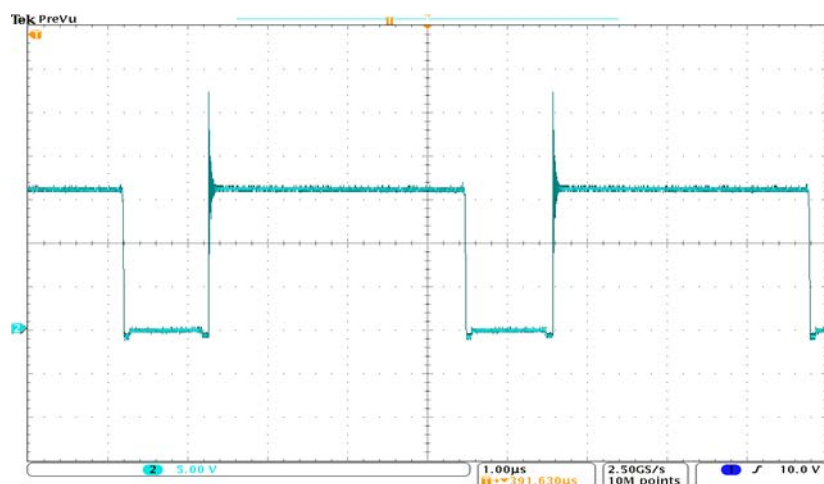


Figure 1. 常见的 buck 开关波形

### 1.2 包含寄生参数的振铃回路等效

Figure 2 展示了包含主要寄生电感和电容的 buck 电路，RC snubber（R 和  $C_{snub}$ ）放置在开关节点和 GND 节点之间。该电路主要用来抑制上管开通瞬间的振铃，而该振铃正是绝大多数过压问题和 EMI 问题的源泉。

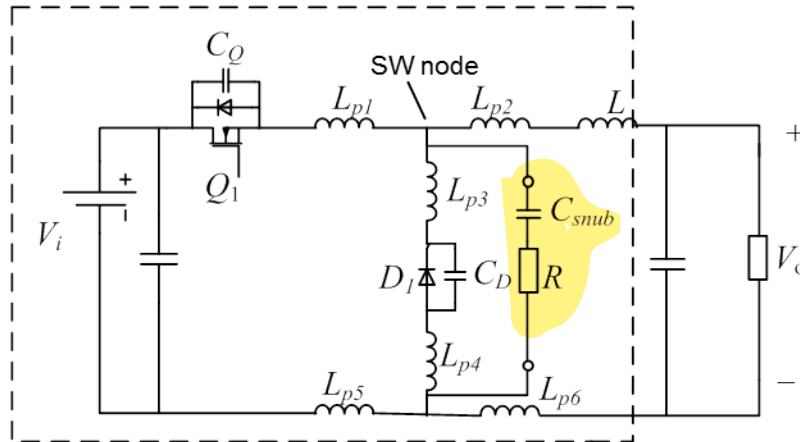


Figure 2. 包括了主要寄生参数的 buck 电路模型

首先由于开关过程在极短时间（从数个纳秒至数十个纳秒）完成，在此过程中电感  $L$  的电流几乎不变，故  $L$  和  $L_{p2}$ （包括串联的  $L_{p6}$ ）不参与振铃。其次，在振铃使得幅值超过  $V_i$  后，上管 MOSFET 的沟道已完全打开， $C_Q$  被短路，也不参与振铃。故最终的振铃回路由图 3 左虚线方框中电路组成。该电路可等效成图 3 中 LC 谐振电路，新的  $L_R$  和  $C_R$  为  $L_{p1}$ 、 $L_{p5}$ 、 $L_{p3}$ 、 $L_{p4}$ 、 $C_D$  等所有参与振铃的寄生感容的复合值。通常 Snubber 的  $C_{snub}$  取值在数 nF 以上，在振铃频率  $f_R$ （加了 snubber 后）下的阻抗很小。以  $C_{snub}=2.2\text{nF}$ ， $f_R=150\text{MHz}$  为例，阻抗为  $1/(j*2\pi f_R * C_{snub})=-0.48j\Omega$ 。而  $R$  一般在数欧姆以上，故 figure 3 左可进一步近似等效为 figure 3 右。

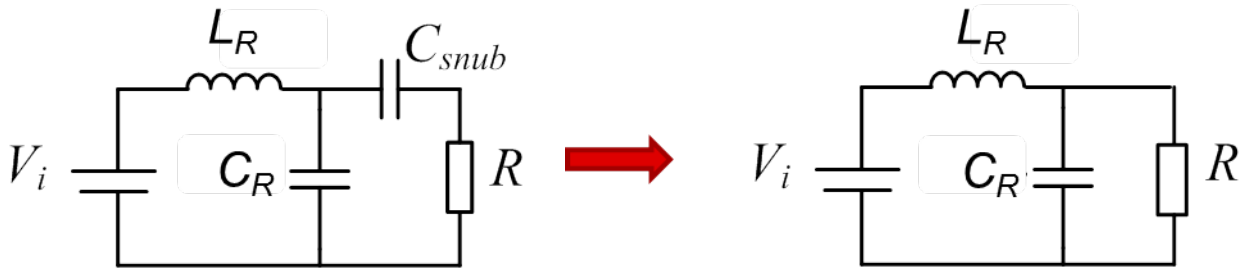


Figure 3. 上管振铃电路等效模型

### 1.3 等效模型下的 snubber 参数计算

由 figure 3 电路，可得到，

$$V_i = L_r C_r \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{L_r}{R_{snub}} \frac{du_C}{dt} + u_C \quad (1)$$

故为使电路电路为阻尼振铃， $R$  的取值为

$$R \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}$$

(2)

Figure 4 给出了不同电阻值的仿真对比。仿真条件为:  $L_{p1}=L_{p5}=10\text{nH}$ ,  $L_{p3}=L_{p4}=2\text{nH}$ ,  $C_{\text{snub}}=10\text{nF}$ ,  $C_D=200\text{pF}$ 。

当  $R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}$ , 电压振幅最低。

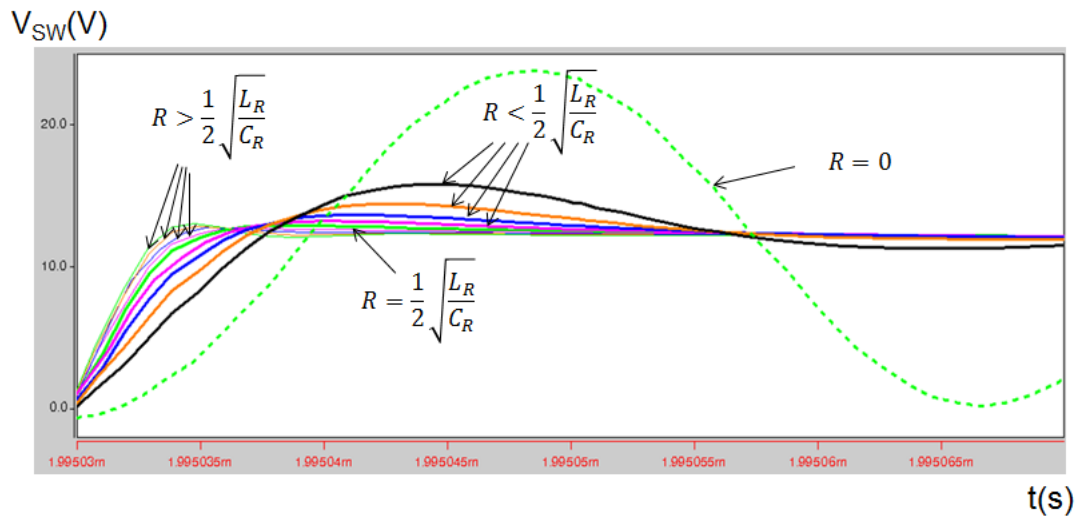


Figure 4. 不同电阻值下对振铃的抑制效果对比

同时,  $C_{\text{snub}}$  越大, 在 RC snubber 并联到  $C_R$  后, 实际等效的  $C_R$  会更大, 意味着同样的阻尼电阻对振铃抑制效果越好。Figure 5 给出了在相同  $R$  ( $R=2.2\Omega$ , 其他电路寄生参数如前文) 下, 不同  $C_{\text{snub}}$  的仿真结果。电容越大, 抑制振铃振幅效果越好。而且当电容达到一定程度大小以后, 电容的增加给振铃抑制的效果并不显著, 比如图 x 中  $2500\text{pF}$  和  $3500\text{pF}$  对应的振幅对比。究其原因, 在 RC snubber 支路, 电路电抗为  $R+1/(j*2\pi f_R*C_{\text{snub}})$ , 当  $C$  达到使得  $1/(j*2\pi f_R*C_{\text{snub}}) \ll R$  时, 此后  $C$  的进一步增大对电路几乎忽略不计。

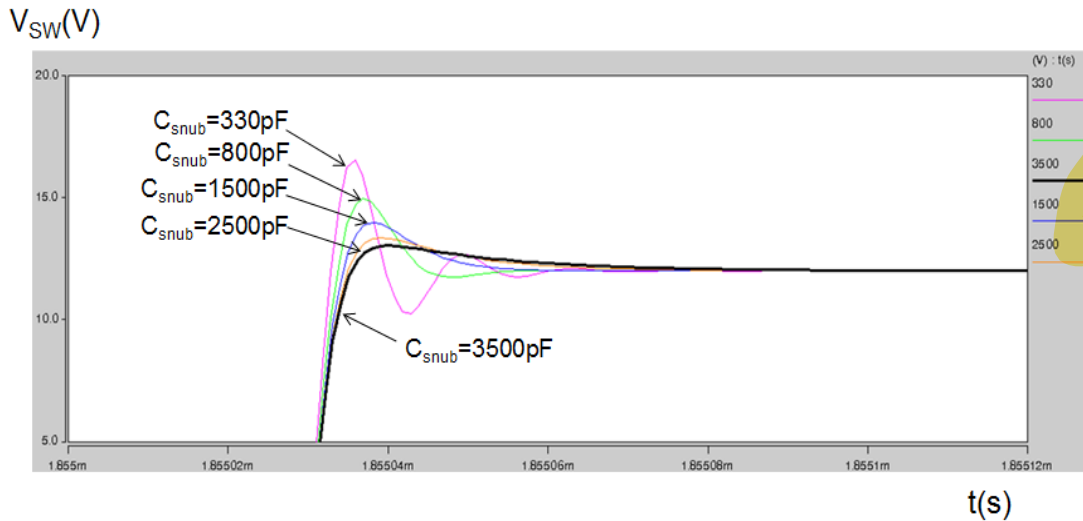


Figure 5. 相同电阻值下电容值变大对振铃的影响

另一个不能忽略的方面是， $C_{snub}$  越大，buck 电路的损耗会越大，效率会越差。损耗包括两个方面。式（3）为 snubber 电阻上的损耗，可知该损耗正比于电容容值。Figure 6 为上管开通瞬间的驱动电压和 MOSFET 上电流电压对应关系。式（4）为 MOSFET 开关损耗(包括开通和关断损耗，并假设开通关断时间一致)，因为其中  $t_2$  随  $C_{snub}$  的增大而增大，开关损耗也随之增大。可见，从较小损耗的角度，电容越小越好。设计者需要在控制功耗和抑制振铃之间找到较好的平衡。

$$P_{snub} = \frac{1}{2} C_{snub} \times V_{SW\_peak}^2 \times f_{SW} \quad (3)$$

上式中， $V_{SW\_peak}$  为振铃峰值， $f_{SW}$  为开关频率。

$$P_{SW} = (t_1 + t_2) \times V_{SW} \times I_{SW} \times f_{SW} \quad (4)$$

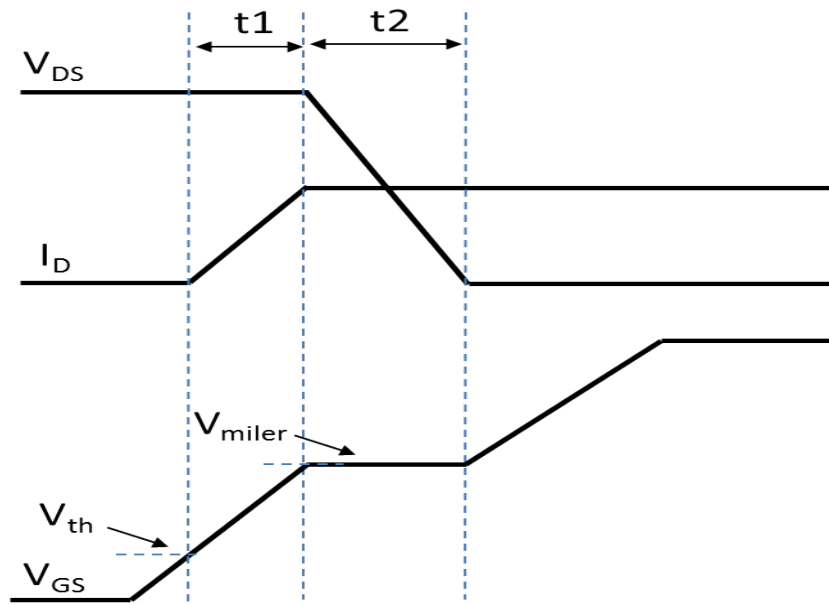


Figure 6. 上管开通瞬间关键节点波形

## 2 一种实用快捷的 snubber 设计方法

### 2.1 设计步骤

根据以上的讨论，下文给出一个基于上文讨论等效模型的实用快捷的缓冲电路设计方法。

第一步，需要确定图 figure 3 中的  $L_R$  和  $C_R$ 。首先测量初始振铃频率。

$$f1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} \quad (5)$$

然后在 snubber 将要放置的位置上，放置一个  $C_{add}$ ，如图 7 所示，因此新的可测得的振铃频率表达式为

$$f2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R(C_R + C_{add})}} \quad (6)$$

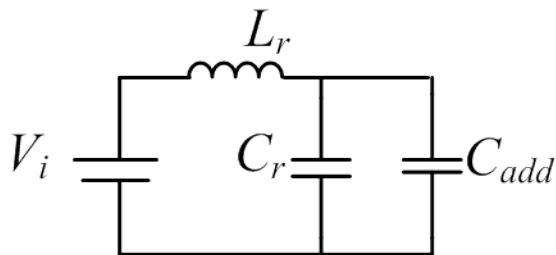


Figure 7. BOOT charging circuit

以上两式中，仅  $L_R$  和  $C_R$  为未知量，故可通过两式联立，解得  $L_R$  和  $C_R$ 。

$$L_R = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2 C_{add} \times 4\pi^2} \quad (7)$$

$$C_R = \frac{f_2^2 C_{add}}{f_1^2 - f_2^2} \quad (8)$$

第二步，选取合适的  $R$  值，使得  $R$  值近似于

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (9)$$

注意，电阻的封装应考虑散热。使得电阻功率等级大于电阻上损耗。电阻损耗表达式为，

$$P_{snub} = \frac{1}{2} C_{snub} \times V_{SW\_peak}^2 \times f_{SW} \quad (10)$$

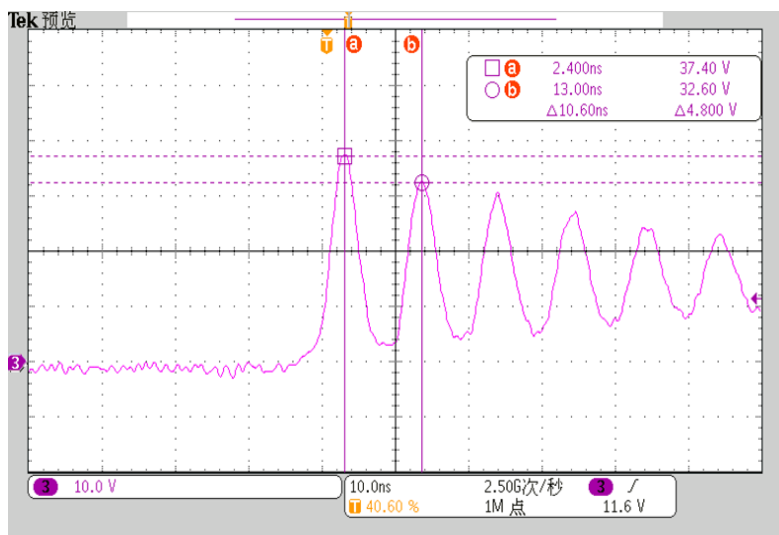
第三步，选择合适的电容值  $C_{snub}$ 。如前文所说，电容值的选择是振幅抑制和控制损耗的折中。可选择以式（11）作为起点，根据损耗情况和振幅抑制效果，进行进一步的调整：增大电容抑制振幅，减小电容提高效率。

$$\frac{1}{2\pi f_1 C_{snub}} = \frac{R}{4} \quad (11)$$

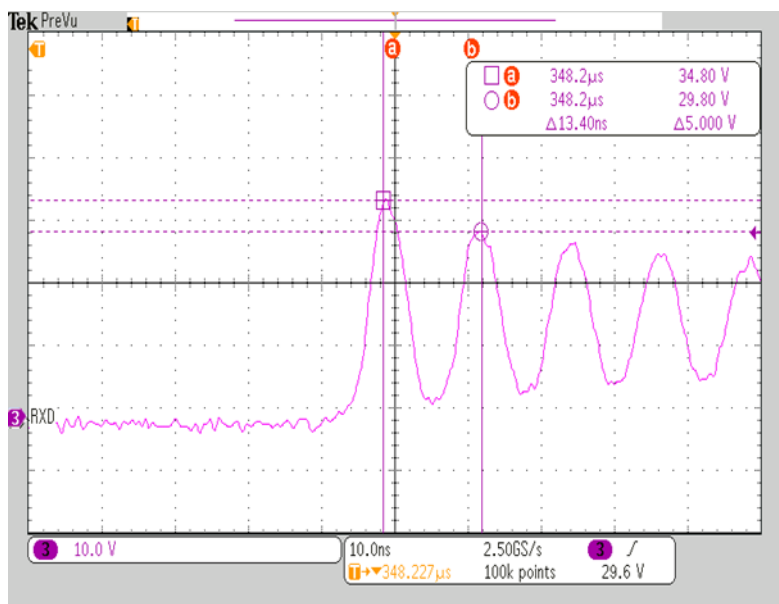
## 2.2 LM5119 EVM 缓冲电路设计实例

以 LM5119 EVM 为例，测试条件为  $V_{IN}=16V$ ， $V_{OUT}=10V$ ， $I_{OUT}=1A$ 。

第一步，通过示波器读出开关上升沿波形，如 figure 8。可知， $f_1=93MHz$ 。在 EVM 原有的空置的 snubber 位置上增加一个新的 220pF 的电容后。新的波形如 figure 9， $f_2=75MHz$ 。故可解得  $L_R=7.5nH$ ， $C_R=387pF$ 。



**Figure 8. LM5119 EVM 原始的振铃波形**



**Figure 9. LM5119 EVM 在 SW 对地增加 220pF 后的振铃波形**

由式(9)

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = 2.2 \Omega$$

故可取 R=2.2 欧姆



再由式（11）。选择接近的  $C_{\text{snub}}=3.3\text{nF}$ 。

最后得到的振铃波形如 figure 10 所示，可见振铃幅度大大减弱。

另外，值得注意的是，该实验结果效果比仿真结果略差。主要原因是 snubber 本身也会导入寄生电感，削弱了 snubber 的效果。因此在实际的操作中，snubber 电路需要尽量选择高频特性好的电阻电容。

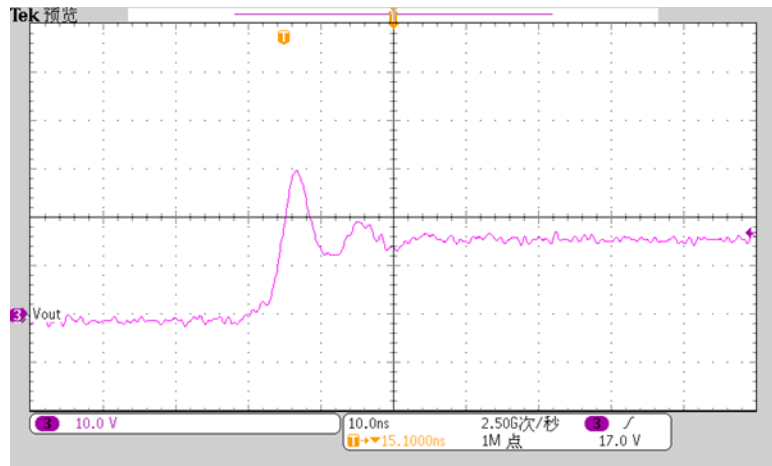


Figure 10. LM5119 EVM 在采用了 2.2Ohm+3.3nF 缓冲电路后的振铃波形

## 参考文献

1. Philip C.Todd, *Snubber Circuits:Theory, Design and Application*, (slup100)
2. Robert Taylor, Ryan Manack, *Controlling switch-node ringing in synchronous buck converters*, (ZHCT161)
3. AN-2065 LM5119 Evaluation Board (SNVA444B)

## 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 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/omap">www.ti.com/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>

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated