

高频、高输入电压 DC/DC 转换器设计挑战

作者: **Richard Nowakowski**, 德州仪器 (TI) 电源管理产品市场营销人员和 **Brian King**, TI 科技委员会应用工程师

DC/DC 转换器的设计频率越来越快, 目的是减小输出电容和电感的尺寸, 以节省电路板空间。正因如此, 现在市场上出现越来越多工作在高输入电压下的 DC/DC 转换器, 其可提供线压瞬态保护, 从而使更快频率下难以达到更低的电压, 因为占空比更低。许多电源集成电路制造厂商 (IC) 正在积极推销高频 DC/DC 转换器, 声称可以减少电路板空间占用。工作在 1MHz 或者 2MHz 下的 DC/DC 转换器似乎是一个好主意, 但开关频率对电源系统产生的影响远不止体积和效率两方面。本文介绍了几个设计实例, 说明在高频下开关存在的一些好处和挑战。

应用选择

为了说明使用高开关频率的权衡过程, 我们设计了三个独立电源, 其工作频率分别为 100、300 和 750 kHz。所有这三种设计, 输入电压均为 48V, 输出电压均为 5V, 而输出电流均为 1A。这些要求常用于为一个 5-V 逻辑 USB, 或者为其它 DC/DC 转换器使用的中频通用 5-V 总线供电, 例如: 低压降稳压器等。若想建立一些设计限制, 所选允许纹波需为 50mV, 其为输出电压的约 1%; 同时选择使用 0.5 A 的峰至峰电感电流。德州仪器 TPS54160 是一种集成 MOSFET 的 2.5-MHz、60-V、1.5-A 降压 DC/DC 转换器, 用作所有设计的稳压器。TPS54160 特有外部补偿和快速可编程频率, 适用于一些高输入电压的工业应用。

电感和电容选择

根据下列四个简化公式, 选择每种情况的电感和电容:

电感选择

$$V = L \times di/dt. \quad (1a)$$

可重写为:

$$L \geq (V_{OUT} + V_{Diode}) \times \frac{1-D}{\Delta I \times f_s}, \quad (1b)$$

其中, D (占空比) = $5 \text{ V} / 48 \text{ V} = 0.104$, 且 $\Delta I = 0.5 \text{ A}$ 峰至峰。

电容选择

$$I = C \times dv/dt \quad (2a)$$

可重写为:

$$C \geq \frac{2 \times \Delta I}{8 \times f_s \times \Delta V} \quad (2b)$$

其中, $\Delta I = 0.5 \text{ A}$ 峰至峰, 且 $\Delta V = 50 \text{ mV}$ 。

就方程式 2b 而言, 我们假设所选电容的等效串联电阻 (ESR) 忽略不计, 陶瓷电容便是如此。我们选择陶瓷电容, 用于所有三种设计, 原因是其低电阻和小尺寸。方程式 2b 分子的乘数 2 表明 DC 偏压相关电容下降情况, 原因是大多数陶

瓷电容的数据表中都没有说明这一效应。

图 1 TPS54160 参考示意图

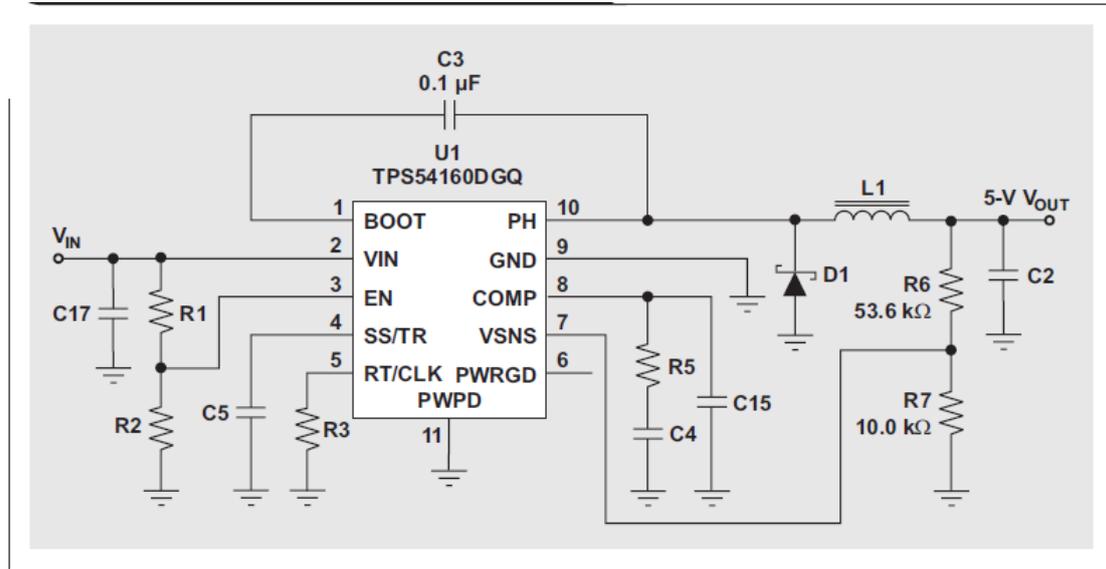


图 1 所示电路用于评估实验台上每种设计的性能。示意图中没有值的一些组件，为设计中修改了的组件。输出滤波器由 L1 和 C2 组成。所有三种设计的组件值都列举在表 1 中，这些值的选择是基于方程式 1a 到 2b 的结果。注意，每个电感的 DC 电阻随频率增加而减小。这是因为较少的匝数所需的铜长度更短。我们单独为每个开关频率设计了误差放大器补偿组件。选择补偿值的计算方法，超出了本文讨论的范围。

最小“导通”时间

最小可控“导通”时间限制是 DC/DC 转换器 IC 的一个特点，其为脉宽调制(PWM)电路的最窄可达脉宽。在降压转换器中，开关周期期间功率 MOSFET 导通的时间百分比被称作占空比，其等于输出电压与输入电压的比。使用 TPS54160 转换器时，占空比为 0.104 (4 V/48 V)，而数据表中列出的最小“导通”时间为 130 ns。可控脉宽限制产生一个最小可达占空比，而用最小“导通”时间乘以开关频率，我们可以轻松地计算出该占空比的大小。一旦知道了最小占空比，利用 VIN 乘以最小占空比，我们便可以计算出最低可达输出电压。最低输出电压同样也受转换器基准电压的限制，使用 TPS54160 时其为 0.8V。

本例中，我们可以通过 750-kHz 开关频率来产生一个 5-V 输出电压（参见表 2）。但是，如果该频率为 1 MHz，则最低可能输出电压被限制为约 6V；否则，DC/DC 转换器会跳过脉冲。替代方法是降低输入电压或者频率。在选择某个开关频率以前，你最好是先查看 DC/DC 转换器数据表，了解保证最小可控“导通”时间。

脉冲跳跃

DC/DC 转换器无法足够快速地清除门驱动脉冲来维持理想占空比时，便会出现脉冲跳跃。电源会尝试调节输出电压，但由于距离更远的脉冲，纹波电压会增加。由于存在脉冲跳跃，输出纹波会呈现出分谐波成分，其可能出现噪声问题。限流

电路也可能不再正常工作，因为 IC 可能不响应大电流峰值。一些情况下，如果控制器不正常工作，控制环路便可能会不稳定。

效率和功耗

DC/DC 转换器的效率，是进行电源设计时需要考虑的最重要属性之一。低效率会转换成高功耗，必须要在印刷电路板（PCB）上使用单独的散热器或者更多的铜，才能处理这些功耗。功耗也对电源上游器件提出了更高的要求。如表 3 所示，功耗共有几个组成部分。

三个例子的重要损耗组成部分，来自于 FET 驱动损耗、FET 开关损耗和电感损耗。FET 电阻和 IC 损耗是一致的，因为所有三个设计中都使用了相同的 IC。由于所有例子中都选择了低 ESR 的陶瓷电容，因此电容损耗可以忽略不计。为了表明高频开关的影响，我们对每个例子的效率都进行了测量，并将其显示在图 2 中。该图清楚地表明，效率随开关频率增加而下降。若想提高所有频率下的效率，需要寻找到一种全负载状态下低漏到源“导通”电阻、低门电荷或者低静态电流规范的 DC/DC 转换器；或者寻找到一些具有更低等效电阻的电容和电感。

表 1 三个举例电源设计的电容和电感选择

SWITCHING FREQUENCY (kHz)	C2 (μ F)/SIZE	L1 (μ H)	L1 DC RESISTANCE (max) (m Ω)
100	47/1206	100	240.9
300	10/0805	33	180
750	4.7/0603	15	135

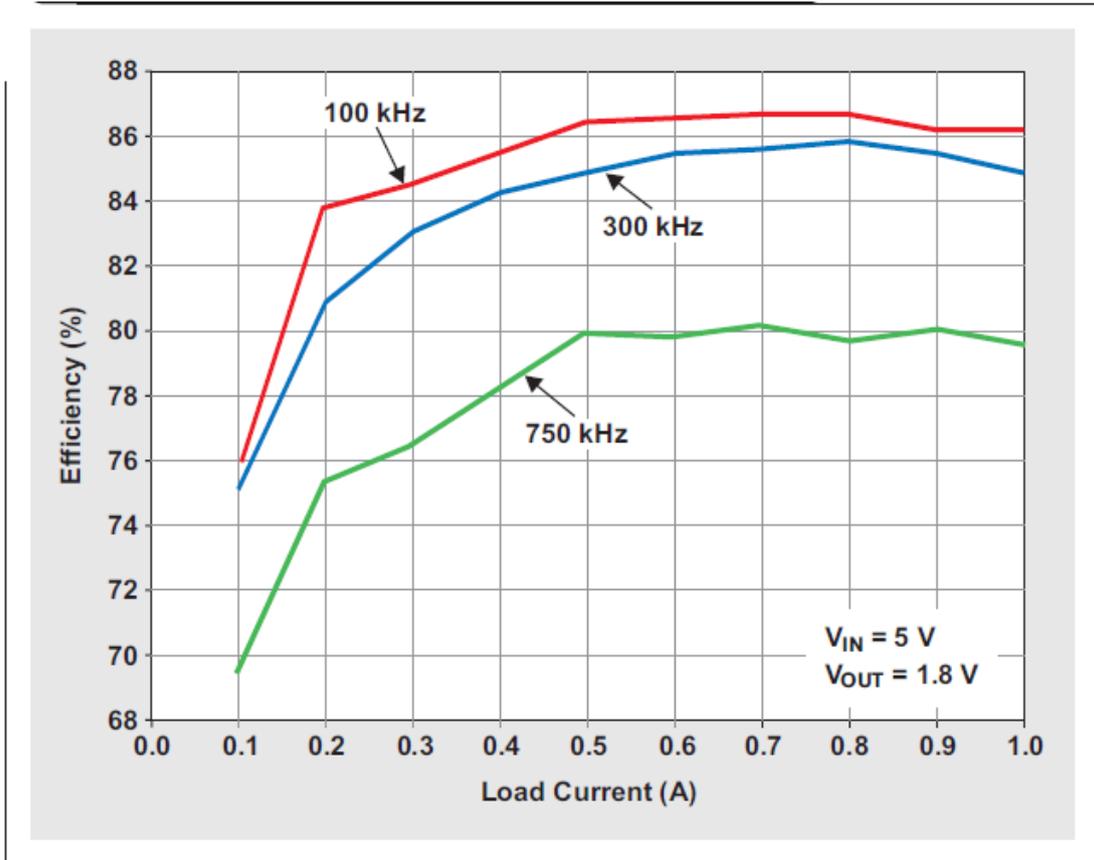
表 2 130-ns 最小“导通”时间的最小输出电压

SWITCHING FREQUENCY	MINIMUM DUTY CYCLE	MINIMUM V_{OUT} at 48 V_{IN} (V)
100 kHz	0.013	0.8 (V_{REF})
300 kHz	0.039	1.87
750 kHz	0.098	4.7
1 MHz	0.13	6

表 3 功耗组成部分

LOSS COMPONENT	FACTORS
FET driving loss	Function of gate charge, drive voltage, frequency
FET switching loss	Function of V_{IN} , I_{OUT} , FET rise/fall time, frequency
FET resistance	$I^2 \times R_{DS(on)}$
Diode loss	$V_f \times I_{OUT} \times (1 - D)$
Inductor loss	$I^2 \times \text{DC resistance} + \text{AC core loss}$
Capacitor loss	$I_{RMS}^2 \times \text{ESR}$
IC loss (I_Q)	Datasheet specification for I_Q for when the IC is operating

图 2 三个举例频率下 TPS54160 的效率



组件尺寸

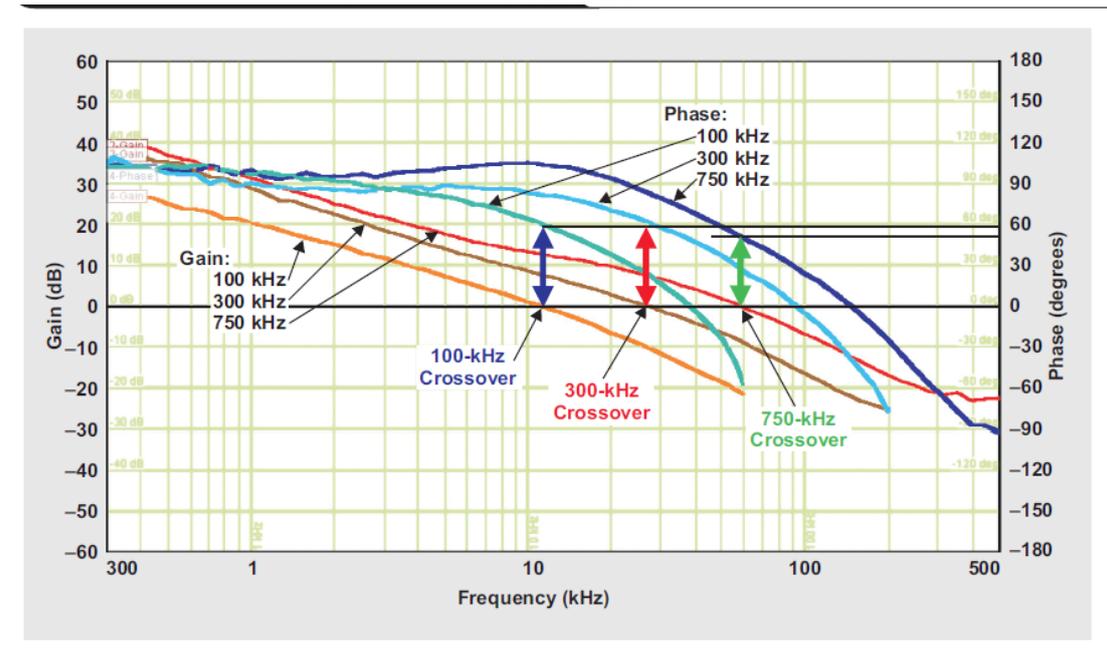
表 4 列出了三种设计要求的总电路板面积，以及电容和电感的焊盘面积。电容或者电感的建议焊盘面积，稍稍大于单个组件本身，且三种设计举例均使用了该面积。每个组件占用的面积相加（其包括 IC、滤波器以及所有其它小型电阻器和

电容的焊盘尺寸)，然后将得到的结果乘以 2 倍（考虑到组件的间距），便得到总面积。100-kHz 和 750-kHz 设计之间存在近 250 mm^2 的总面积节省，从而使滤波器体积缩小 50%，而板空间占用减少 55%。但是，存在收益递减规律，因为电容和电感值无法减少至零！换句话说，不断推高频率并不能够一直减小总尺寸，因为你无法总是能够在市场上买到这些尺寸适合且批量生产的电感和电容。注意，33- μH 和 15- μH 电感占用相同的面积。存在这种可能性，是因为 33- μH 电感的高度为 3.5 mm，而 15- μH 电感仅高 2.4 mm。我们想通过这两种电感来说明的观点是：电感与体积成正比例关系。

表 4 组件尺寸和总面积要求

SWITCHING FREQUENCY (kHz)	CAPACITOR C2 (μF /SIZE)	CAPACITOR AREA (mm^2)	INDUCTOR L1 (μH)	INDUCTOR AREA (mm^2)	TOTAL AREA (mm^2)
100	47/1206	18.9	100	150	420
300	10/0805	11.5	33	43.5	192
750	4.7/0603	6.5	15	43.5	182

图 3 100kHz、300 kHz 和 750 kHz 的波特图



瞬态响应

瞬态响应是电源性能级别的一个较好指标。我们利用每种电源的波特图来表明高开关频率的对比情况（参见图 3）。如图所示，每个电源的相位裕度在 45° 和 55° 之间，其表明瞬态响应得到较好的抑制。交叉频率约为开关频率的 $1/8$ 。使用快速开关 DC/DC 转换器时，设计人员应确保电源 IC 误差放大器具有足够的带宽来支持高交叉频率。TPS54160 误差放大器的单位增益频宽一般为 2.7 MHz。表 5 显示了实际瞬态响应时间以及电压峰值过冲的相关值。开关频率越高，过冲值便越是更低，原因是更宽的带宽。

表 5 瞬态响应

SWITCHING FREQUENCY (kHz)	CROSSOVER FREQUENCY (kHz)	PHASE MARGIN (degrees)	RESPONSE TIME (μ s)	VOLTAGE PEAK (mV)
100	10	60	1000	350
300	30	60	300	300
750	60	50	150	240

表 6 小占空比时抖动与“导通”时间之比

SWITCHING FREQUENCY (kHz)	ON TIME	JITTER/ON TIME (%)
100	1.1 μ s	2
300	365 ns	5
750	150 ns	13

抖动考虑

高转换比和更高频率时，会存在噪声问题。当选择某个高开关频率时，设计人员应考虑抖动和 DC/DC 转换器的最小“导通”时间。当占空比较小时，抖动噪声便为开关脉冲的更大百分比。表 6 显示了 48-V 到 5-V 转换比时，抖动与“导通”时间之比。我们假设，在该相位节点上存在 0.5-V 二极管压降和 20-ns 抖动。

结论

设计高频开关转换器时，存在许多折中考虑。本文介绍的一些优点包括更小的尺寸、更快的瞬态响应，以及更小的电压过冲/欠冲。获得这些优点的代价是效率低和散热多。但是，在挑战性能极限的过程中同样也存在许多陷阱，例如：脉冲跳跃和噪声问题。在为高频应用选择一种宽输入电压 DC/DC 转换器以前，我们应该首先查看制造厂商提供的数据表，以了解一些重要的规范，例如：最小“导通”时间、误差放大器的增益带宽、FET 电阻以及 FET 开关损耗。在这些规范下运行良好的 IC 价格昂贵，但却对得起它的价格；在设计人员担心如何处理某个棘手的设计问题时，其更加易于使用。

相关网站

power.ti.com

www.ti.com/sc/device/TPS54160

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	http://www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	http://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	http://www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	http://www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	http://www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	http://www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	http://www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	http://www.ti.com.cn/microcontrollers	无线通信	www.ti.com.cn/wireless
RFID 系统	http://www.ti.com.cn/rfidsys		
RF/IF 和 ZigBee® 解决方案	www.ti.com.cn/radiofre		
	TI E2E 工程师社区		http://e2e.ti.com/cn/

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 © 2011 德州仪器 半导体技术(上海)有限公司