

自举驱动 buck 电路的缓慢下电问题与解决

Zhengxing Li

Sales and Marketing/East China

ABSTRACT

上管驱动为自举方式的 buck 电路的正常工作需要通过下管的开通来给自举电容充电，由于这样的特性，在下电过程中一旦输入电压接近输出且维持时间较长，即下管的导通时间短，自举电容的电压得不到有效补充，从而造成输出电压异常重启。本应用报告结合 TPS5405 的一个设计实例，分析了该现象的原因，分别从芯片设计和应用的角度分别讨论了常见解决方案。最后提出了一种简单有效的自举电容电压维持电路，并给出相应的计算依据和实验结果。

Contents

1	TPS5405 缓慢掉电案例	2
2	自举驱动上管的 buck 电路的缓慢下电问题	2
3	如何从设计上保证缓慢下电过程的平滑	4
3.1	芯片设计的考虑	4
3.2	应用设计的考虑	5
3.2.1	常见的应用措施	5
3.2.2	一个有效的外部自举电容能量维持电路	6
4	参考文献	8

Figures

Figure 1.	TPS5405 电路缓慢掉电波形	2
Figure 2.	自举电容充电回路	3
Figure 3.	使用电荷泵驱动上管	4
Figure 4.	Forced Turn-on of Low-side FET Q2	5
Figure 5.	不精确的 EN 门槛定义实例	5
Figure 6.	使用 EN 门槛来设置 VIN 的关断门槛	6
Figure 7.	一个实用的自举电容能量维持电路	7
Figure 8.	增加了自举电容维持电路后的 TPS5405 电路缓慢掉电测试结果	8

1 TPS5405 缓慢掉电案例

Figure1 为某 TPS5405 设计的缓慢掉电波形, CH1 为输出电压 VOUT, CH2 为输入电压 VIN。测试条件为 VIN=12V, VOUT=5V, 负载电流 IOUT=50mA, 输入电容 C_IN=1800uF, 其他电路参数与 TI 参考设计一致 (参考 TPS5405 EVM, SLVSBF7B)。可当输入电压 VIN 缓慢掉到 5V 附近, VOUT 突然掉落, VIN 继续缓慢下行, 而 VOUT 多次重复快速爬升和掉落过程, 直至输入电压到 3.5V (TPS5405 的输入电压 UVLO), 输出完全关断。这样的 VOUT 掉电波形在很多系统中是不被允许的, 因为可能会带来一系列的系统问题, 比如负载端 MCU 的程序错误, 存储芯片的数据丢失等。所以当 TPS5405 应用于 VIN 缓慢下电的场合时, 需要有相应的应对措施。

事实上, 该现象是采用自举方式来驱动 N-MOSFET 上管的 buck 电路的一个共性问题。下文将从电路原理出发分析这种现象的根本原因, 讨论多种解决方案。

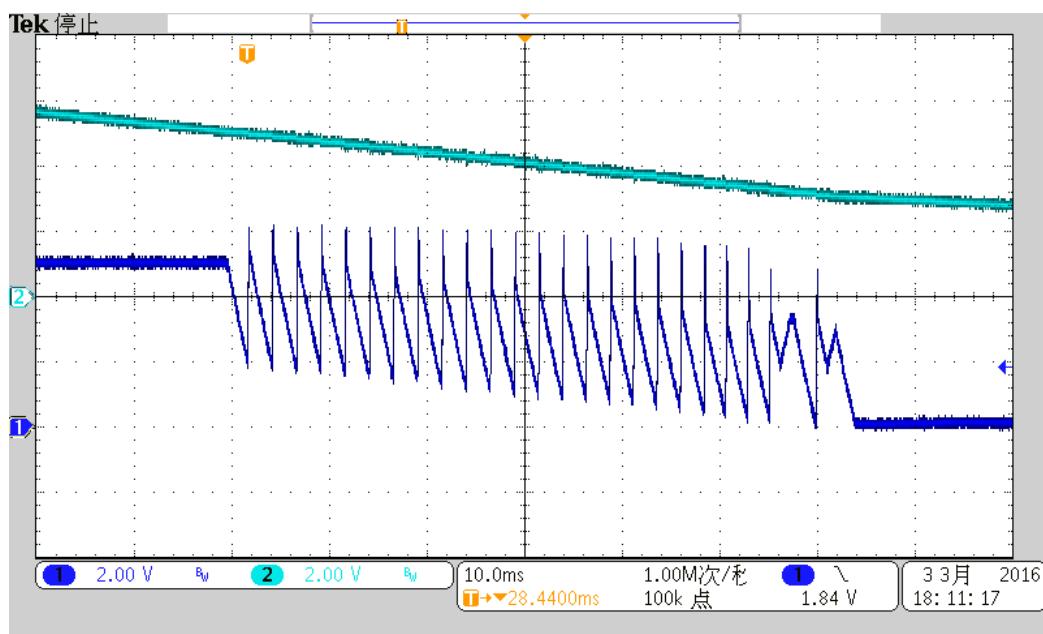


Figure 1. TPS5405 电路缓慢掉电波形

2 自举驱动上管的 buck 电路的缓慢下电问题

理想的变换器电路下电过程是, 输入电压快速下电, 输出随之平顺掉落。但在实际应用中, 变换器电路的输入端往往会有大容量的电容, 包括前级的输出电容, 自身的输入滤波和能量维持电容等 (需要注意的是, 远端的前级输出电容极易被设计人员漏计。)。在这种情况下, 切断输入电源, 变换器的输入电压 (即输入端电容上的电压) 会缓慢下降, 下降时间达到数十毫秒以上。如果没有提前关断变换器的控制电路, 当输入电压 (VIN) 掉落到输出电压 (VOUT) 附近时, 将会出现较长时间 (数毫秒以上) 的 VIN 接近 VOUT 的工作状态。

开关在高边且为 N 沟道 MOSFET 的降压式 buck 电路，通常通过自举方式来驱动上管。那么，在进行该架构的 buck 应用电路设计时，需要考虑输入电压缓慢下降对于电路工作的影响。首先来结合 Figure 2 看看自举电路的工作原理。在一个开关周期里，（1）当上管关断时 (T_{OFF})，下管开通，此时 SW 电压拉低到 GND 电平附近，在 $V_{Bandgap}$ 和 V_{SW} 之间形成了一个正向压差，故自举电容将通过 $Bandgap \rightarrow Boot Cap \rightarrow SW$ 这个回路得到充电（充电速度跟 Bandgap 的电流能力以及线路的阻抗相关。）；（2）当上管开通时 (T_{ON})，下管关断，此时 SW 电压为高，在 $V_{Bandgap}$ 和 V_{SW} 之间形成了一个反向压差，以上回路关断，同时自举电容给驱动电路供电。即在一个开关周期内， C_{BOOT} 在 T_{ON} 时间的放电能量和 T_{OFF} 时间的充电能量达到了平衡，从而保证了驱动电路的稳定供电。

当 V_{IN} 和 V_{OUT} 很接近时，占空比 (D) 接近 100%，下管开通时间极短，根据以上自举电路原理可知，会造成在 T_{OFF} 内给电容充电的能量小于 T_{ON} 内驱动电路消耗的能量，自举电容上电压 V_{BOOT} 会持续下降。当 V_{BOOT} 下降到驱动电路的 UVLO 后，驱动电路关断，电感电流通过下管续流并迅速掉落，输出电压随之掉落，而下管的开通使得 V_{BOOT} 重新上升；当电感电流掉落至零以后，下管关断， $V_{sw}=V_{OUT}$ ，掉落的 V_{OUT} 使得 Bandgap 电压大于 V_{sw} ，使得 V_{BOOT} 继续上升；当 V_{BOOT} 达到 ULVO 的上门限 (UVLO rising threshold)，驱动电路重新开始工作， V_{OUT} 快速上升。如果驱动电路没有 UVLO 的设计，驱动电路的自然关断点更低，甚至在关断之前有一段 MOSFET 不能完全开通而工作于可变电阻区 (饱和区) 使得输出电压提前掉落的过程，但整个过程相似，本文不再赘述。在驱动电路重新工作和 V_{OUT} 快速回升后，由于此后又处于几乎 D=100% 的状态， V_{BOOT} 电压不能维持，输出电压也因此会重新掉落。从而进入了 V_{OUT} 掉落再重启再掉落的循环反复的过程，直至 V_{IN} 掉落到变换器输入 ULVO。

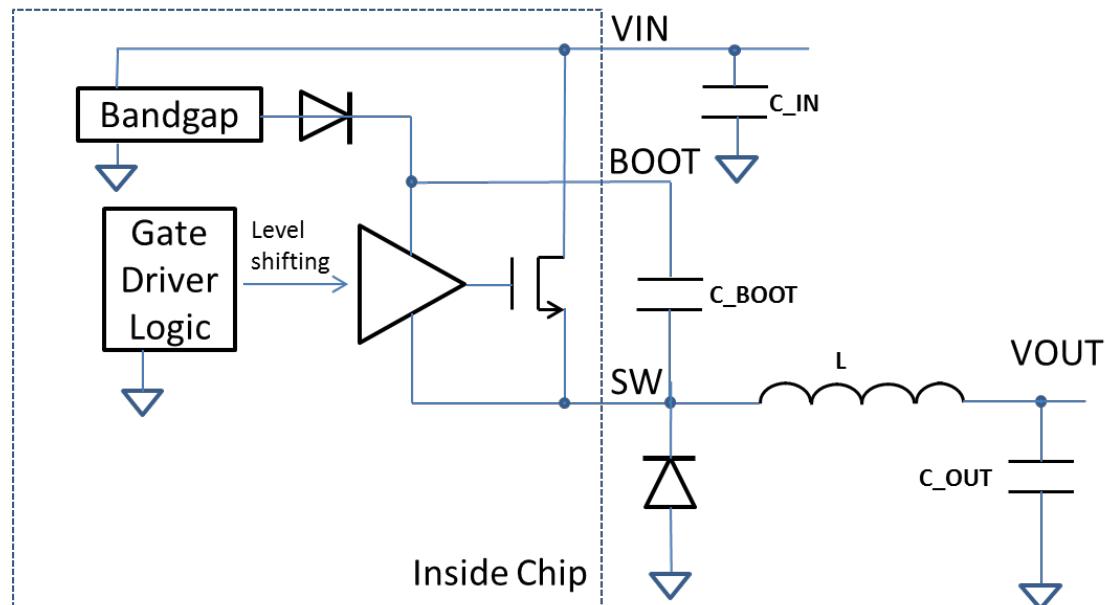


Figure 2. 自举电容充电回路

3 如何从设计上保证缓慢下电过程的平滑

要解决该输出反复重启问题，显而易见的两点措施，（1）在 VIN 掉落到 UVLO 之前，维持住 BOOT 电容的电压不低于上管驱动电路 UVLO 或最低稳定工作电压；（2）或者当 BOOT 电容电压掉落至驱动电路关断后不会再次充电至重新开通的门槛。由于后者的实现涉及到复杂的启动和关电逻辑，实现困难，极少被采用。下文围绕前者，对于高边驱动 N-MOSFET 的 buck 集成电路，将从芯片设计和应用两个角度讨论多个解决方法。

3.1 芯片设计的考虑

从芯片设计的角度，有两种不同的思路。

第一种思路，是根本上改变驱动电源供电方式。如果选用 P 沟道 MOSFET 或者将 N 沟道 MOSFET 放在低端，将不存在高边驱动的问题，故不在本文的讨论范围之内。自举电容驱动方式，电容充电依赖于下管的开通。而图 3 中，使用电荷泵（charge pump）取代自举电容驱动，charge pump 能够始终提供一个稳定的高于 VIN 的高压给驱动电路，从而使得驱动电路工作与开关状态无关。这个方法的缺点是，需要电荷泵电路提供比 VIN 更高的电压，意味着半导体电路使用更高电压等级的工艺，从而可能带来芯片成本的增加。

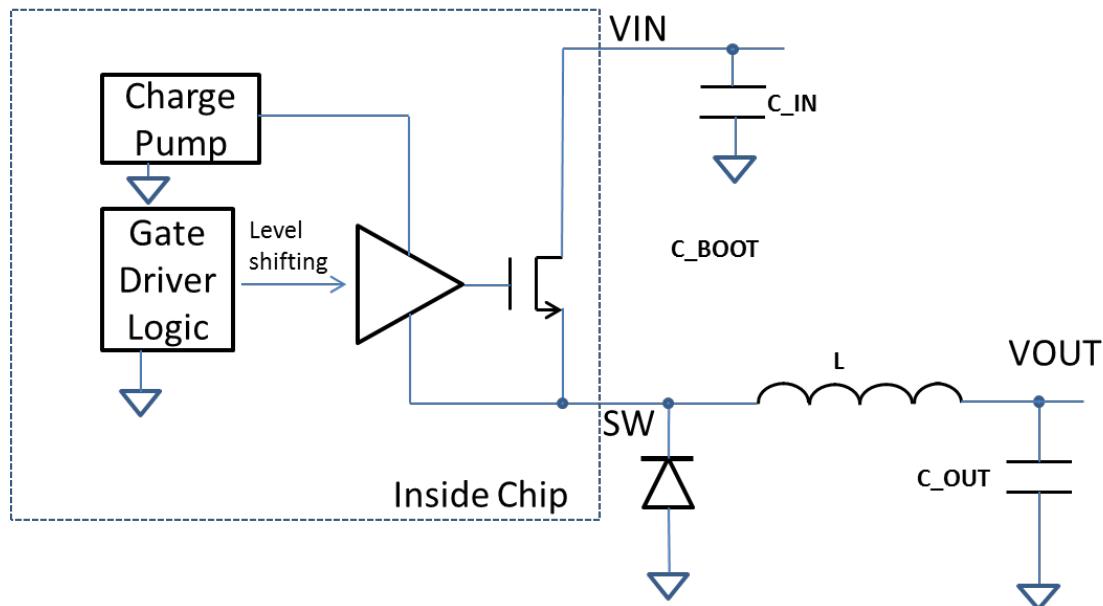


Figure 3. 使用电荷泵驱动上管

第二种思路，仍然采用自举驱动，但采取措施保证自举电容上电压始终高于一定值：即监控自举电容电压，当该电容电压低于某个门限后，强制将 SW 拉低。如 figure 4 所示，芯片内部在 SW 对地之间集成有一个 MOSFET (Q2)，在 C_BOOT 上电压降低到某个值后，将会开通该 MOS 并维护一段时间。对于非同步 buck，需要额外集成这个 MOSFET (该 MOSFET 的电阻通常为数十至百欧姆级)；而对于同步 buck，主电路的下管本身为 MOS，可以复用。该方案的优点是，实现简单，成本低。当应用于常态为大占空比的场合时，自举电容上电压会下降到较低位置后由下管 MOS 开通来补充，造成其平均电压较低，从而使得 MOSFET 的 R_{ds} 比标称值大，故效率和热性能都需要仔细评估。

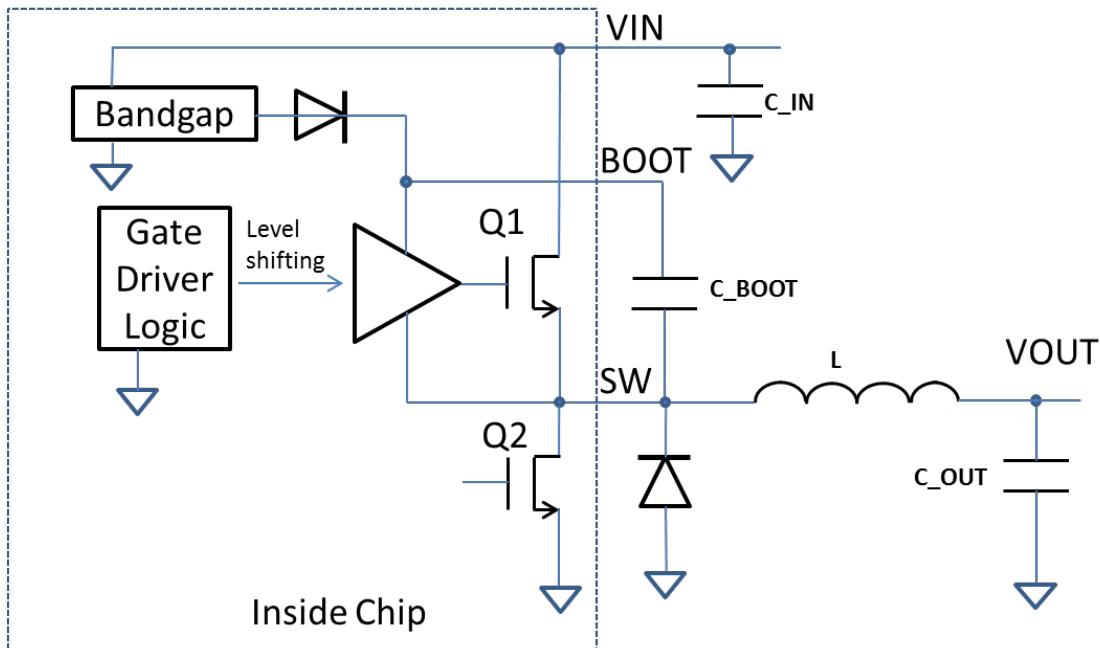


Figure 4. Forced Turn-on of Low-side FET Q2

3.2 应用设计的考虑

但绝大多数的芯片在设计阶段针对于缓慢下电的情况，并没有如上文设计上的应对措施。所以当用户的实际使用场景存在缓慢下电的情况，且输出电压的反复重启会对系统有不良影响，就必须从应用角度采取相应的措施来改善或避免问题的发生。

3.2.1 常见的应用措施

以下措施给出了常见的改进措施（实际操作中可采用单项或多项组合）：

- 加快输入端的放电速度，包括减小输入端总的电容容量(buck 输入电容和前级的输出电容)，增加输入端假负载等。
- 增加 C_BOOT 电容的容量。注意由于内部 BOOT 充电回路的电流能力有限，电容不宜太大，故该容值的上限需要参考 datasheet 或咨询芯片厂商。通常的该电容容值范围在 0.01uF-10uF。
- 减慢 VOUT 下降的速度，比如增加输出电容容量。如果 VOUT 下降速度足够慢，会使得在 VIN 到达 UVLO 之前，V_BOOT(=V_Bandgap-VOUT)仍然没有上升到驱动电路开启电压。
- 使用芯片的使能 EN 功能，设置较高的关断电压点。如 figure 6 图左，通过设置 R1 和 R2 的值来选择合适的关断点。该方案可行的基本要求是，使能的关断门限精度要高。如下 figure 5 中 EN 的门限未能给出精确范围，这样的芯片一般就不能使用该方法。figure 6 图右给出一种不依赖于 EN 关断门限精度的外部电路实现方法。

LOGIC THRESHOLD					
V _{EN}	EN high-level input voltage	EN	1.6	V	V
	EN low-level input voltage	EN	0.6	V	V

Figure 5. 不精确的 EN 门限定义实例

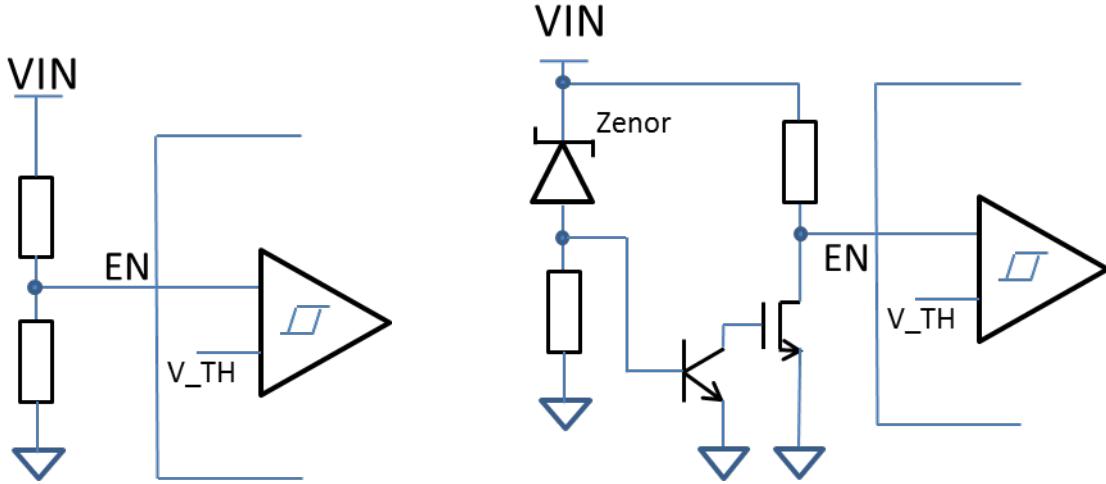


Figure 6. 使用 EN 门槛来设置 V_{IN} 的关断门槛

3.2.2 一个有效的外部自举电容能量维持电路

除了以上常见应用措施外，本文还提出了一个外部自举电容能量维持电路，如 Figure 7。该电路思路和 Figure 3 类似，利用稳态时的 SW 电压，通过一个外部 charge pump 电路产生一个自举电容的备份电源。当发生关机动作时，该电源将提供足够的能量给自举电容，确保其电压在 V_{IN} 到达 UVLO 前正常驱动 MOSFET。

3.2.2.1 电路参数选择

稳态工作时，

$$V_B = V_{EX} - V_D + V_{D1}$$

V_D 为二极管 D2 或 D3 的导通电压， V_{D1} 为 buck 下管二极管导通电压（同步的 buck，可认为该电压为零。）。

当 V_{BOOT} 电压掉落时使得 D3 导通时，

$$V_{BOOT} = V_B - V_D = V_{EX} - 2V_D + V_{D1}$$

由上式，可知 V_{EX} 电源的取值应在 MOSFET 安全驱动电压范围。对于一般集成 MOSFET 的芯片，该电压范围一般为 3.5V-5.5V。

根据上管驱动电路的最低工作电平 V_{UV} ，和 MOSFET 的驱动损耗等，就可以大概估算出 C_B 的最低容量。理论上，只需保证电容提供的能量大于 MOSFET 驱动消耗的能量。

$$\frac{1}{2} \times C_B \times (V_B^2 - V_{UV}^2) \geq Q_g \times f_{sw} \times V_B \times t_{off}$$

上式中, V_B 为备份电容 C_B 上电压, V_{UV} 为驱动电路 UVLO (失效门槛电压), Q_g 为 MOSFET 的驱动总电荷, f_{sw} 为开关频率, t_{off} 为 V_{IN} 从 1.1 倍 V_{OUT} 掉落到 V_{IN} 的 ULVO 的时间。

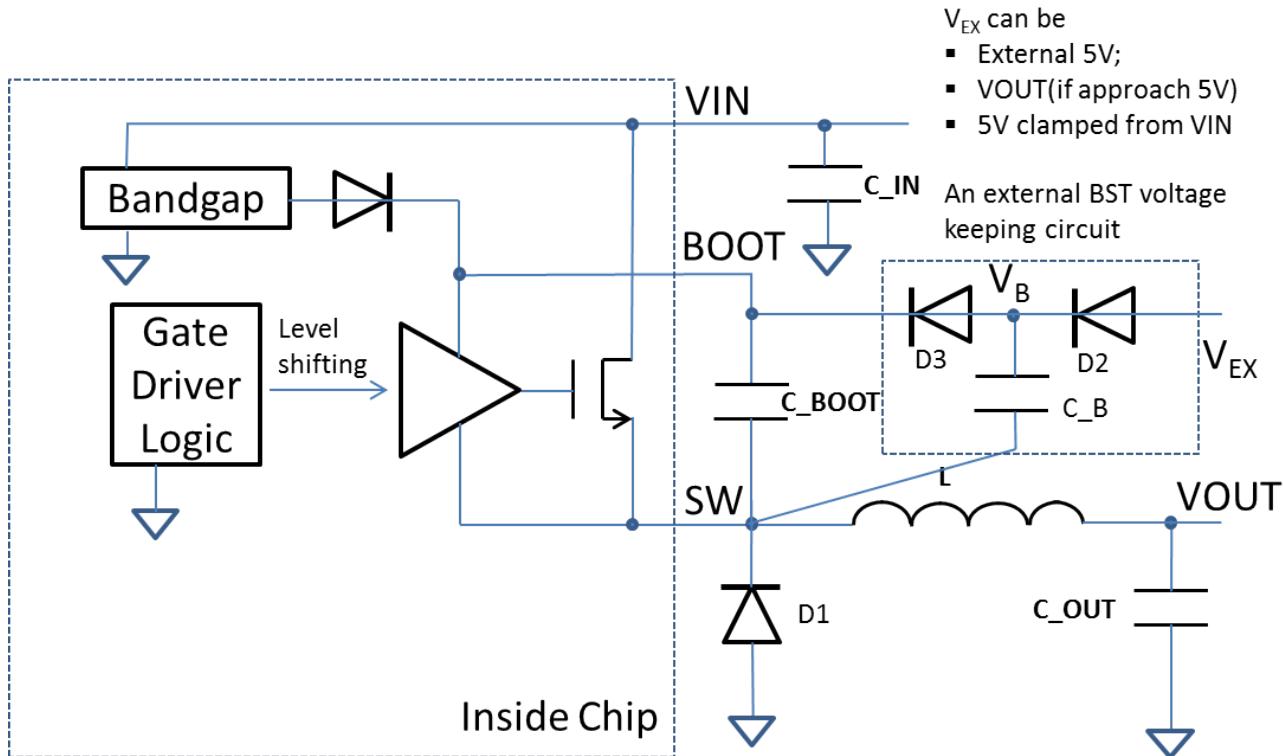


Figure 7. 一个实用的自举电容能量维持电路

3.2.2.2 自举电容能量维持电路解决 TPS5405 缓慢下电问题

通过在上述 TPS5405 电路上增加该外部自举电容能量维持电路 ($C_B=4.7\mu F$) 后, 其他条件不变, V_{IN} 下电速度不变, 新的下电波形如 Figure 8。可以看到输入输出接近的时候, V_{OUT} 跟随 V_{IN} 缓慢平滑下降, 直至 V_{IN} 达到 3.5V (V_{IN} UVLO 点), 此时电路完全关闭, V_{OUT} 快速掉落。

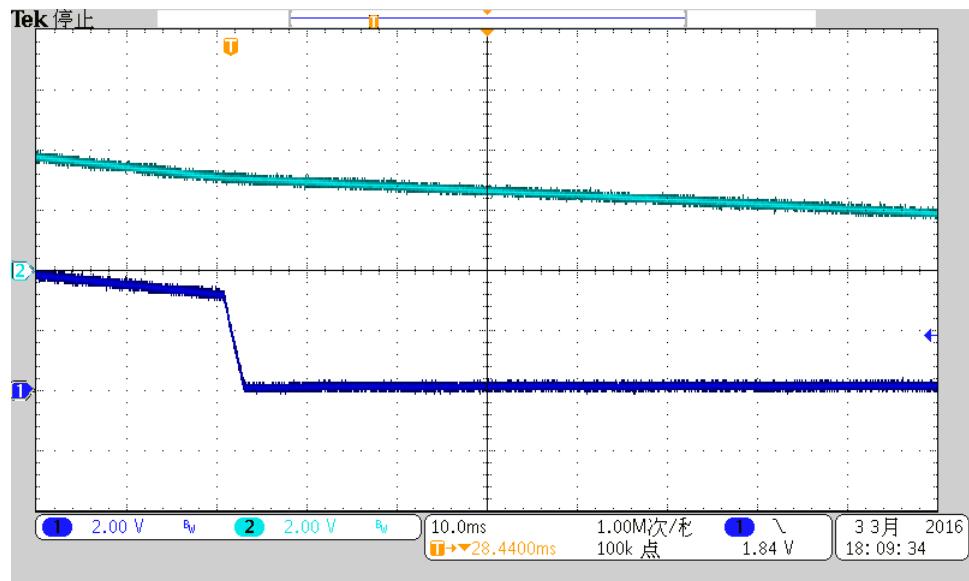


Figure 8. 增加了自举电容维持电路后的 TPS5405 电路缓慢掉电测试结果

4 参考文献

1. *TPS5405 datasheet (SLVSBF7B)*
2. *TPS5405EVM User's Guide (SLVU739)*

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 组件或服务的所有暗示或显示授权, 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在其应用中使用 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 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 应用处理器 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