

Application Note

基于 TPS61299 的超低电压 (150mV) 启动设计



Nini Zhong, Alan Xia, Jing Ji

摘要

热水器在日常生活中很常见，其原理与燃气灶类似。当触发点火开关时，会点燃火，而热电偶会被火焰加热。此时会产生热电势，而热电势将启动整个热水器的控制系统，例如 MCU。因此，低压启动特性是首选的特性，这样可以减少选择热电偶的成本和启动时间。基于上述应用，本应用手册提出了采用升压转换器 TPS61299 的超低电压启动方案。

内容

1 热水器介绍.....	2
2 低压启动升压转换器简介.....	2
2.1 TPS61299 简介.....	2
2.2 传统启动过程简介.....	2
2.3 降压模式和升压模式运行.....	3
3 TPS61299 超低电压启动设计.....	5
3.1 超低电压启动设置.....	5
3.2 AVIN 影响启动过程的方式.....	6
3.3 Vout 影响启动过程的方式.....	7
3.4 L 影响启动过程的方式.....	8
4 超低电压启动设计.....	10
4.1 测试波形.....	10
5 总结.....	11
6 参考资料.....	11

插图清单

图 1-1. 热水器控制示意图.....	2
图 2-1. 传统启动设计的典型原理图.....	2
图 2-2. 超低输入电压启动设计的典型原理图.....	3
图 2-3. TPS61299 的启动过程.....	3
图 2-4. 降压模式拓扑.....	4
图 2-5. 降压模式波形.....	4
图 2-6. 升压模式拓扑.....	4
图 2-7. 升压模式波形.....	4
图 3-1. TPS61299 150mV 输入电压启动.....	5
图 3-2. AVIN = 0.7V 时的启动波形.....	6
图 3-3. AVIN = 2V 时的启动波形.....	6
图 3-4. 使用不同 AVIN 时的电感器电流.....	7
图 3-5. 不同 VOUT 下的电感器电流.....	7
图 3-6. 不同 L 对应的电感器电流.....	8
图 3-7. 具有较大电感时的电感器电流.....	9
图 3-8. PVIN=70mV (VOUT=2.0V, 无法启动)	9
图 3-9. PVIN=80mV (VOUT=3.3V).....	9
图 3-10. 不同 PVIN 下的电感器电流曲线.....	9
图 4-1. 80mV PVIN 启动波形.....	10

表格清单

表 3-1. 参数设置.....	5
表 3-2. 不同 AVIN 对应的启动时间.....	6
表 3-3. 不同 VOUT 对应的最小启动 PVIN.....	7
表 3-4. 启动所需的最小 PVIN 与电感间的关系.....	8
表 4-1. 设计参数.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 热水器介绍

在一些能量收集应用中，输入源的电压低至 150mV，因此需要升压转换器来为系统提供更高的电压。热水器就是一个很好的例子：当热水器打开时，压电陶瓷会点火，产生一个小火焰来提高热电偶的温度，这次是由于两个端子上存在温差。热电偶开始产生热电势（低至 150mV），作为升压转换器的输入，然后升压转换器将输出调节到 3.3V，以打开热水器的控制部分，如图 1-1 所示。但是，升压转换器很难在超低输入电压下启动，并且大多数升压器件的 UVLO 为 1.8V 或 0.7V，更不要说只有 150mV 了。本应用手册提供了使用 TPS61299 支持 150mV 超低输入电压系统的解决方案。

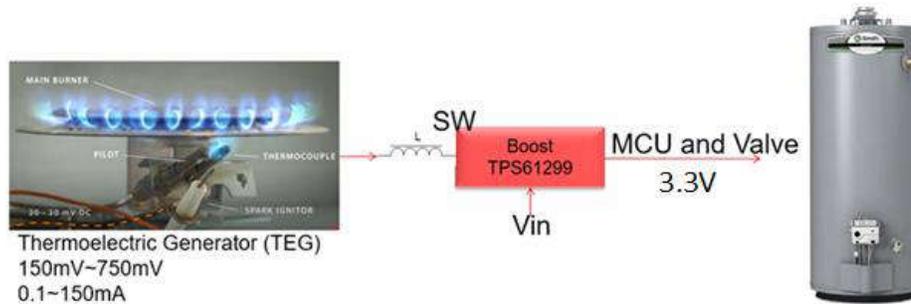


图 1-1. 热水器控制示意图

2 低压启动升压转换器简介

2.1 TPS61299 简介

TPS61299 是一款同步升压转换器，采用迟滞控制方案运行。当在 $V_{IN} > 0.7V$ 情况下电源输入信号仅为 150mV 时，可实现超低启动电压。此外，为了在轻负载时实现高效率，TPS61299 仅消耗 95nA 的静态电流，而且该系列产品提供 5mA 至 1.9A 的宽输入电流限制，并在 EN 为低电平时支持可选的真正关断或强制直通。TPS61299 为不同的系统提供快速瞬态性能模式和精确的负载调整模式。

2.2 传统启动过程简介

图 2-1 展示了连接电源输入 (PVIN) 和模拟输入 (PVIN) 时的传统启动解决方案。图 2-2 展示了 PVIN 和 AVIN 分别供电的超低功耗 VIN 启动解决方案。升压转换器的内部启动过程是相同的。

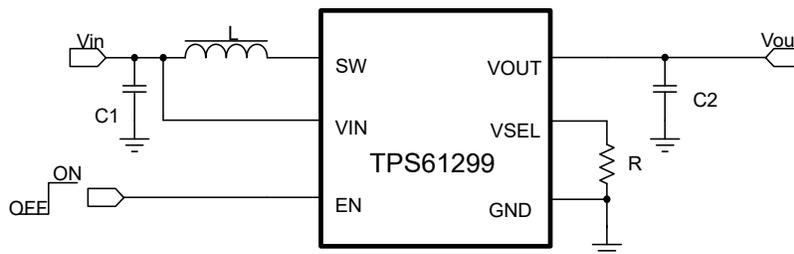


图 2-1. 传统启动设计的典型原理图

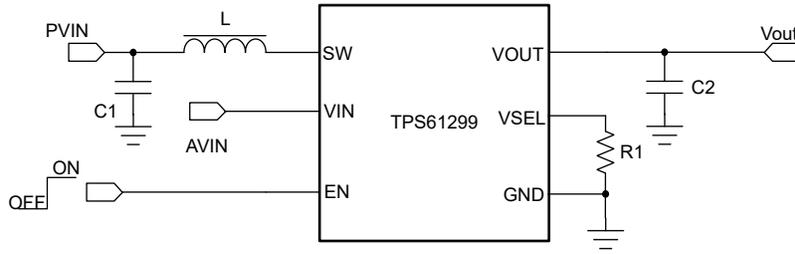


图 2-2. 超低输入电压启动设计的典型原理图

将 EN 引脚连接到高电压后，TPS61299 开始启动，该过程可分为 5 个阶段，如图 2-3 所示。

阶段 1：当输出电压低于 0.5V 时，器件行为与短路保护相同，以限制输出功率来提供短路保护。

阶段 2：当输出电压高于 0.5V 时，器件在不连续导通模式 (DCM) 和连续导通模式 (CCM) 的边界运行，并且在这个阶段，电感器峰值电流限制在大约 350mA。

阶段 3：当输出电压达到 1.8V 后，TPS61299 开始检测 VSEL 引脚的输出电压配置，然后锁存配置。版本检测时间取决于 VSEL 引脚处的电阻，电阻越高，版本检测时间越长。例如，对于 5V 正常版本，TPS61299 需要大约 170us 来进行版本检测。TPS61299 会通过将电阻器设置选项从较低的设置逐渐增加到较高的设置来检查 VSEL 引脚，直至用户通过 10 μs 时钟找到所需的设置配置。

阶段 4：检测到该配置后，TPS61299 开始锁存基准输出电压，而 VOUT 开始斜升至目标值。TPS61299 在运行期间不会检测 VSEL 引脚，因此在运行期间更改电阻器不会更改 VSEL 设置。在运行期间切换 EN 引脚是刷新设置的一种方法。

阶段 5：版本检测后，TPS61299 继续开关，输出进一步斜升。对于高输入电流限制版本器件（例如 250mA、500mA、1.2A 和 1.9A 版本），当输出电压低于 2.5V 时，TPS61299 通过将电感器平均电流限制在 500mA 以下下来降低启动期间的浪涌电流（250mA 版本的输入电流限制为 250mA）。当输出电压升至 2.5V 以上时，则将释放上述输入电流限制，并将其设置为版本定义电平。

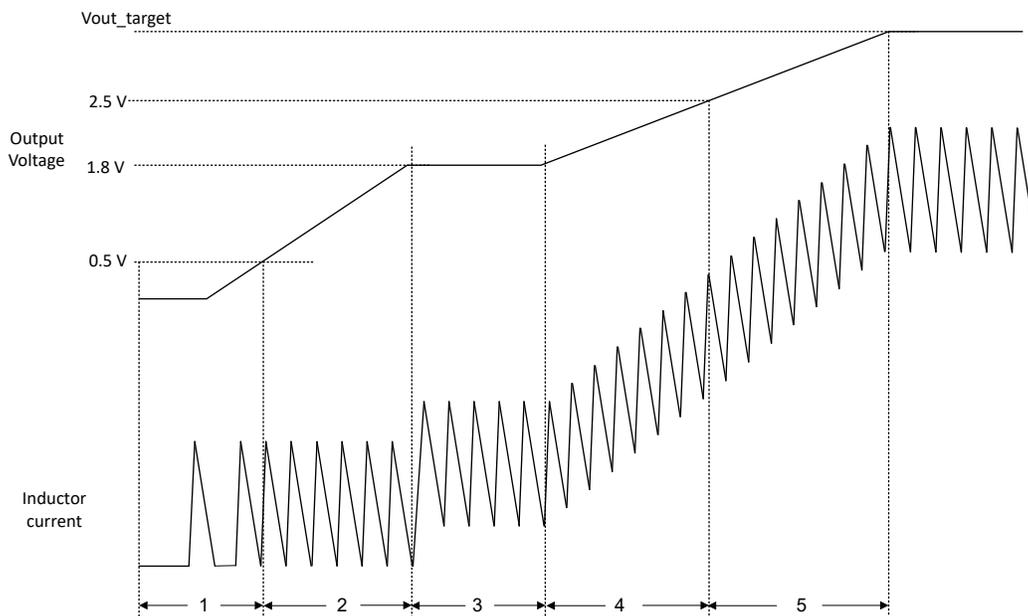


图 2-3. TPS61299 的启动过程

2.3 降压模式和升压模式运行

待添加：在启动期间，当输入电压高于输出电压时，TPS61299X 在降压模式下工作，以保持开关状态。在降压模式下，高侧 PMOS 源极切换到 SW 节点，而不是 Vout（升压模式下）节点。请参阅图 2-4 和图 2-6，以比较高侧

PMOS 在降压模式和升压模式之间的差异。在 t_{off} 周期内，高侧 PMOS 的栅极总线被拉至输入电压 (V_{IN})，而不是地，然后源极节点 (即 SW 节点) 可以由 PMOS 的内部 C_{gs} (高侧 PMOS 的 V_{gs_th} 约为 $0.7V$) 充电到 $V_{IN}+V_{gs_th}$ 。请参阅图 2-5，以了解电感电流和 SW 节点电压。因此，SW 总线电压比 V_{in} 高 $0.7V$ ，然后电感器可以放电，能量可以转换为输出。

在降压模式下，高侧 PMOS 在饱和区下工作，而不是完全导通状态，因此其效率要比升压模式低得多。这样，PMOS 两端的压降增加至足以调节输出电压的程度。在这种模式下，功耗也会增加，并需要考虑散热。因此，可以仔细考虑器件版本的电流限制，因为如果负载太重，以至于输入电流接近电流限制，则由于降压模式下效率降低，器件可能无法正常启动。另外，在降压模式下，电流限制也将降低。

当 V_{out} 斜升超过输入电压后，该器件进入升压模式。高侧 PMOS 的源极节点会切换至 V_{OUT} 总线，如图 2-6 所示。图 2-7 展示了电感器电流和 SW 节点电压波形。在 t_{off} 周期内，SW 高侧 PMOS 导通，因此 SW 电压等于 V_{OUT} ，这意味着电感器上的压降为 $V_{OUT}-V_{IN}$ 。

总体而言，所示启动解决方案之间的主要差异是器件在 V_{IN} 引脚上的实际电压差异，这决定了器件退出降压模式和进入升压模式时的阈值。由于升压模式的效率比降压模式高得多，启动过程的行为可能有很大不同，具体将在节 3 中详细讨论。

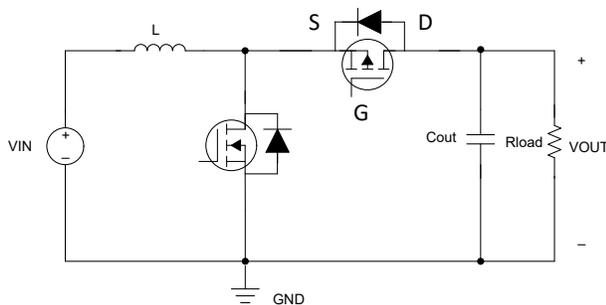


图 2-4. 降压模式拓扑

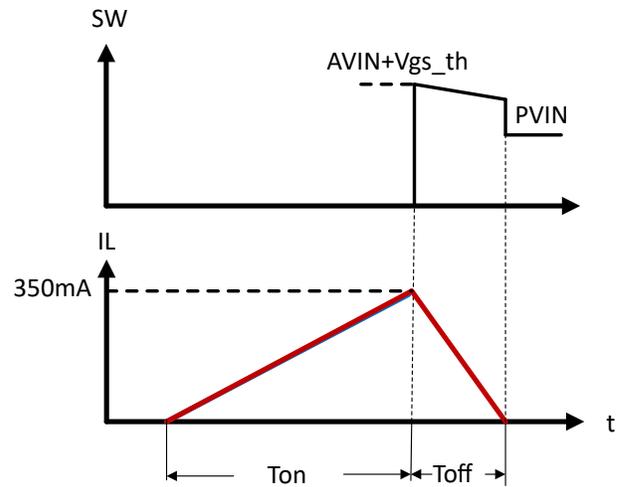


图 2-5. 降压模式波形

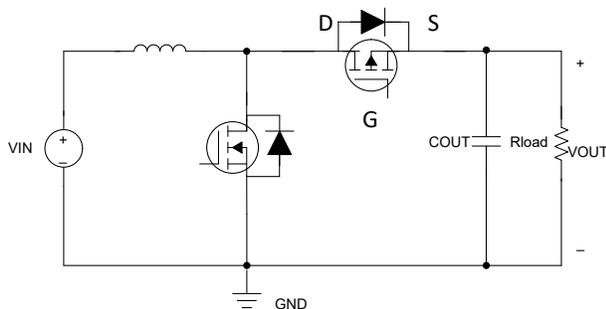


图 2-6. 升压模式拓扑

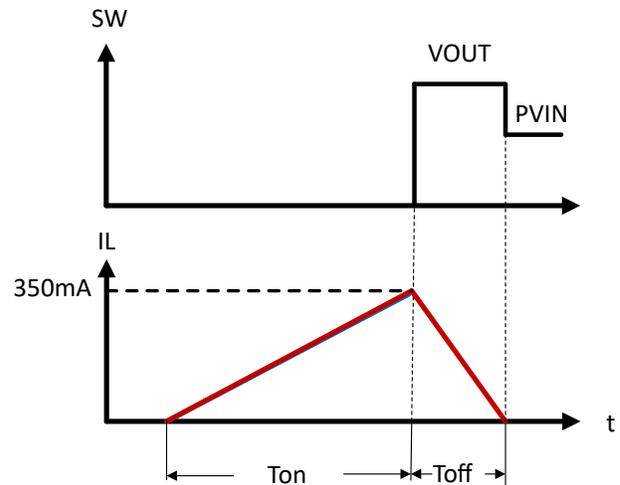


图 2-7. 升压模式波形

3 TPS61299 超低电压启动设计

3.1 超低电压启动设置

图 2-2 展示了基于 TPS61299-103 EVM 实现 150mV 低压启动的过程，其中 AVIN 和 PVIN 是分开的。表 3-1 中介绍了相关参数。

表 3-1. 参数设置

参数	值
PVIN (SW)	150mV
AVIN (VIN)	0.7V
VOUT	3.3V
L	1 μ H
LOAD	OPEN

该启动过程如图 3-1 所示。

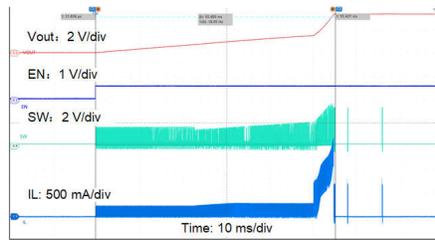


图 3-1. TPS61299 150mV 输入电压启动

以下几个部分中研究了 AVIN、VOUT 和 L 等元素对启动过程有何影响。

3.2 AVIN 影响启动过程的方式

表 3-2 展示了启动时间 ΔT 随不同 AVIN 的变化，其中 $V_{OUT} = 3.3V$ 、 $P_{VIN} = 150mV$ 且 $L = 1\mu H$ 。 ΔT 是 V_{OUT} 从目标电压的 10% 斜升至 90% 的时间。随着 AVIN 的增加，启动时间会逐渐缩短。

表 3-2. 不同 AVIN 对应的启动时间

AVIN (V)	ΔT (ms)
0.7	55.4
1	81.6
1.2	88.6
1.5	92.8
2	96.1
3	244

图 3-2 和图 3-3 展示了 AVIN=0.7V 和 2V、 $P_{VIN}=150mV$ 、 $V_{OUT}=3.3V$ 、 $L=1\mu H$ 时的启动过程。可以看到，AVIN = 0.7V 时的启动过程更快。这两个设置下的启动时间变化主要是因为降压模式周期。不同 AVIN 会导致差异是因为内部模块应检测 AVIN 并将其与 V_{out} 进行比较，以决定是退出降压模式还是进入升压模式。

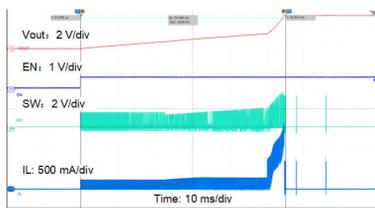


图 3-2. AVIN = 0.7V 时的启动波形

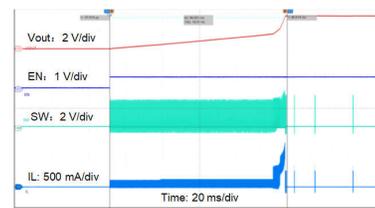


图 3-3. AVIN = 2V 时的启动波形

在图 2-3 所示的初始阶段，当 V_{in} 高于 V_{out} 时，TPS61299 会进入降压模式，原理图如图 2-4 所示。之后，器件会退出降压模式并进入升压模式，直到 V_{OUT} 斜升至 AVIN。AVIN 越低，器件越早退出降压模式运行并进入升压模式运行。在升压模式下，效率要高得多，因为高侧 MOSFET 会完全导通，而不是在饱和区工作，这意味着可以将更多能量转换为输出，因此转换器可以更快地调节到 V_{OUT} 目标。

在降压模式下，在 T_{on} 周期内，低侧 MOSFET 导通，而电感器电流斜升；在 T_{off} 期间，低侧 MOSFET 关断，而高侧 MOSFET 导通。根据电感器的伏秒平衡原理，电感的微分表达式为方程式 1 和方程式 2：

在 T_{on} 期间：

$$L \frac{di}{dt} = P_{VIN} \quad (1)$$

在 T_{off} 期间：

$$L \frac{di}{dt} = SW - P_{VIN} \quad (2)$$

这两种情况下的 T_{on} 周期基本相同，因为 P_{VIN} 都是 150mV。在 T_{off} 期间，由于不同 AVIN 下 SW 节点电压不同，因此电感器两端的压降会发生变化。由于 PMOS 内部 C_{gs} 的影响，高侧 PMOS 的源极节点电压会因其充电至 $AVIN + V_{gs(th)}$ 而发生变化。图 3-4 展示了 AVIN=2V 和 0.7V 时的电感器电流，其中 AVIN=0.7V 时的关断时间要长得多。

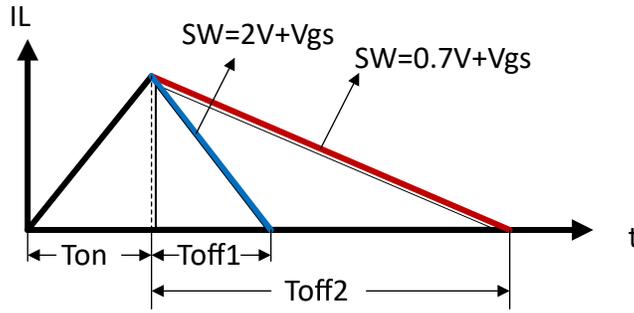


图 3-4. 使用不同 AVIN 时的电感器电流

综上所述，建议选择更低的 AVIN 以实现超低 VIN 启动。但是，AVIN 必须高于 TPS61299 的 UVLO，这意味着最小 AVIN 为 0.7V。

3.3 Vout 影响启动过程的方式

本段重点介绍了 Vout 对最低 PVIN 启动的影响。表 3-3 展示了在 AVIN = 0.7V、L = 1μH 相同且目标 VOUT 彼此不同的条件下支持常规启动的最小 PVIN。

表 3-3. 不同 VOUT 对应的最小启动 PVIN

VOUT (V)	PVIN _{min} (mV)
1.8	90
3.3	120
5	140

如表 3-3 所示，VOUT 越大，PVIN 启动速度越慢。图 3-5 展示了不同 VOUT 对应的电感器电流。当 VOUT 大于 AVIN 时，器件将在升压模式下工作。在 PVIN 没有太大差异的情况下，主要差异在于高侧 PMOS 导通时的周期，以 T_{off} 表示。

如图所示，Vout 越低，电感器电流下降越平坦，T_{off} 时间越长，这意味着一个开关周期内转换到输出侧的能量越多，因为使用 T_{off} 周期：

$$L \frac{di}{dt} = VOUT - PVIN \quad (3)$$

因此，转换到输出总线的功率按从大到小的顺序排列如下：VOUT = 1.8V、VOUT = 3.3V、VOUT = 5V。

综上所述，较低的 VOUT 可以实现更好、更快的启动行为。

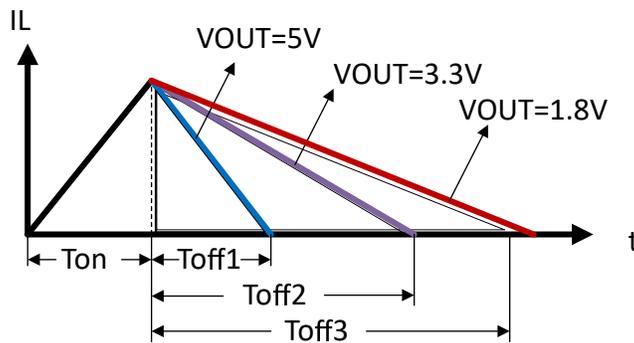


图 3-5. 不同 VOUT 下的电感器电流

3.4 L 影响启动过程的方式

根据常识，无论纹波和环路稳定性如何，较低的功率电感都可能导致更多的能量转换到输出侧。然而，如果考虑到 DCR，那么并非全是这种情况，因为较大的 DCR 可能会导致启动失败。这与 AVIN 和 VOUT 如何影响启动过程略有不同，下文对此进行了详细说明。

表 3-4 展示了在 VOUT=3.3V、AVIN=0.7V 的条件下能够成功启动的电感和最小 PVIN。

表 3-4. 启动所需的最小 PVIN 与电感间的关系

L(uH)	PVIN _{min} (mV)
0.47	100
1	90
1.5	80
2.2	80
3.3	80
4.7	80
6.8	110
22	启动失败

备注

实验中选择电感 DCR 控制在 40mΩ 以内，并尽可能减少 Rdc 差异对实验的影响。

如表 3-4 所示，当电感小于 4.7uH 时，随着电感的增加，TPS61299 可实现更低 PVIN 启动。但是，当电感高于 4.7uH 时，继续增加电感不会按预期实现更低 PVIN 启动。启动无法正常输出的原因应与激励和放电期间电感器的总能量有关，节 3.4.1 中进一步分析了其原因。

3.4.1 为什么电感越大，启动所需的 PVIN 越小？

随着电感减小，由于电感电流斜率较小，转换到输出侧的功率会增加，如图 3-6 所示。

因此，根据方程式 3，在 $t_{on} < t_{on_max}$ 且 AVIN 和 VOUT 相同的条件下，L 越大， di/dt 就越小。那么， t_{on} 周期内便可以存储更多的能量，并且 t_{off} 周期内将有更多的能量转换到输出。因此，电感越大，启动所需的 PVIN 越低。

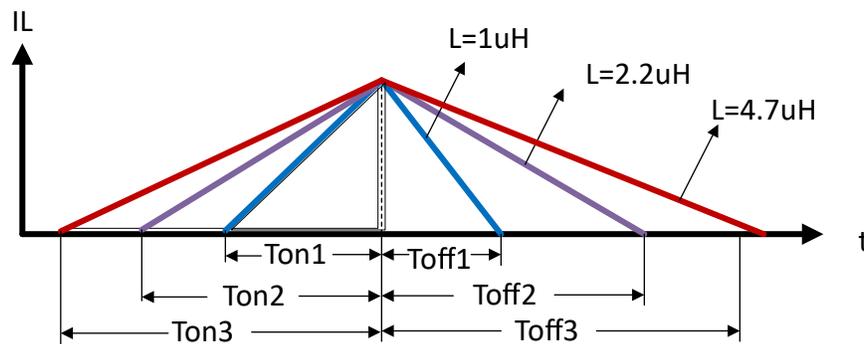


图 3-6. 不同 L 对应的电感器电流

3.4.2 为什么电感继续增大时启动所需的最小 PVIN 却不会降低

低侧 MOSFET 的 T_{on_max} 限制了电感器的激励时间，因此在电感超过特定值后，在激励时间保持不变的情况下， V_{OUT} 会保持不变。 L 越大， di/dt 就越小。当低侧 MOSFET 的导通时间达到 T_{on_max} 时，电感的峰值电流未达到迟滞电流 (350mA)，低侧 MOSFET 会被强制关断，然后高侧 MOSFET 导通。因此转换的能量较少，因此 V_{OUT} 无法正常调节到目标电压。

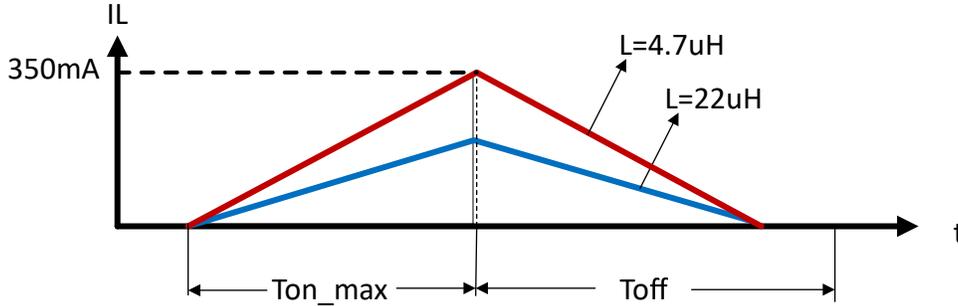


图 3-7. 具有较大电感时的电感器电流

3.4.3 为什么 80mV 时可以正常启动，而 70mV 时却无法启动？

图 3-8 和图 3-9 是 $L = 2.2\mu H$ 、 $A_{VIN} = 0.7V$ 、 V_{OUT} 目标 = 3.3V 且 P_{VIN} 分别为 70mV 和 80mV 时的测试波形。图 3-8 展示了 $P_{VIN} = 70mV$ 且输出尚未提升至目标电压的情况。

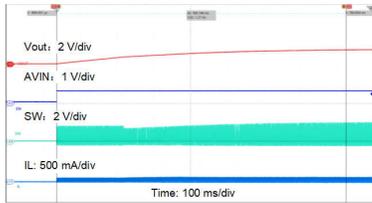


图 3-8. $P_{VIN}=70mV$ ($V_{OUT}=2.0V$ ，无法启动)

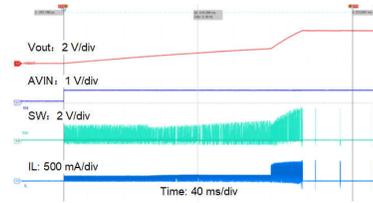


图 3-9. $P_{VIN}=80mV$ ($V_{OUT}=3.3V$)

图 3-10 展示了不同 P_{VIN} 对应的电感器电流。当 P_{VIN} 只有 70mV 时，输入功率信号已经很弱，因此达到 T_{on_max} 时，储存在 T_{on} 级的电能只足以使输出升高至 2.0V，如图 3-10 所示。当 $P_{VIN}=80mV$ 时，功率输入也相对较弱，但它可以确保在 T_{on_max} 之前，该器件可以确保储存的电储足以将输出提高至 3.3V。

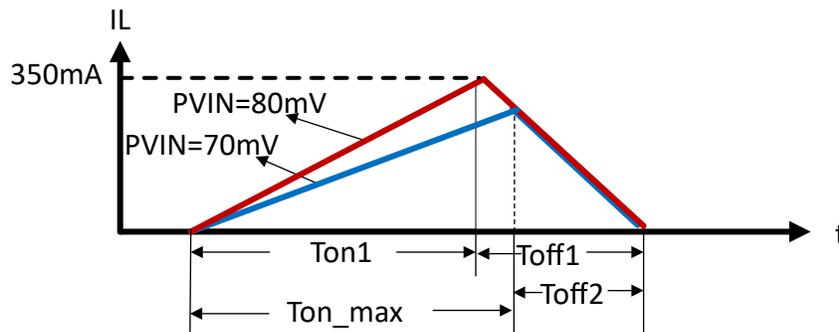


图 3-10. 不同 P_{VIN} 下的电感器电流曲线

4 超低电压启动设计

4.1 测试波形

根据节 3 中的实验测试和分析，建议选择较低的 AVIN、较低的 VOUT 和较高的电感，以实现超低 VIN 启动。不过，AVIN 应高于 UVLO，这意味着最小 AVIN 为 0.7V。为了防止 t_{on} 达到 t_{on_max} ，建议使用 1.5uH 或 2uH 的电感。结合以上所有分析，这里提出了一种实现极低电压启动的典型解决方案，如表 4-1 所示。图 2-2 展示了相应的原理图。具体的解决方案参考设计如下：

表 4-1. 设计参数

参数	值
PVIN (SW)	80mV
AVIN (VIN)	0.7V
VOUT	3.3V
L	1.5uH 或 2.2uH
R1	0Ω
C1	10μF
C2	10μF
LOAD	OPEN

该启动过程如图 4-1 所示。

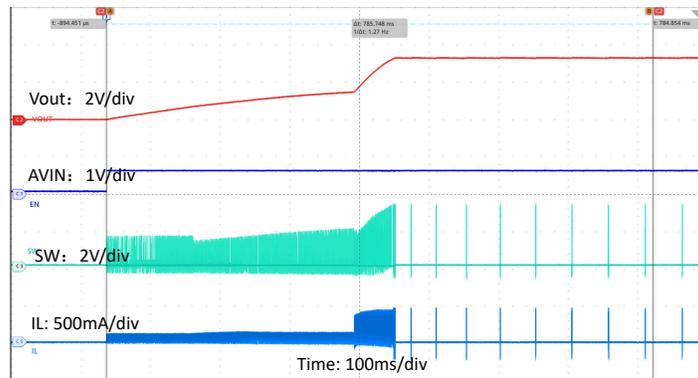


图 4-1. 80mV PVIN 启动波形

综上所述，本文提出并验证了一种使用升压转换器 TPS61299 的超低功耗输入解决方案。为了优化启动过程，这里研究了 AVIN、VOUT 和 L 等元素，以了解它们对启动有何影响。最后，考虑到实际电感和预期的 VOUT，这里推荐并验证了使用具有较低 PVIN 应用的优化解决方案。

5 总结

德州仪器 (TI) 低压启动功能使用户能够实现最小功率 V_{in} ，从而可以实现低压电池启动或由热信号产生电势。在此过程中，电感器会比传统的启动设计要小，从而节省了总设计尺寸和成本。低输入电压启动功能广泛用于热水器、燃气灶等等。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[TPS61299 具有输入电流限制和快速瞬态性能的 95nA 静态电流、5.5V 升压转换器](#) 数据表。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司