

Kristoffer Flores

摘要

降压电源模块可实现高度集成，不仅可以简化电源设计流程，还有助于缩短产品上市时间。有关电源模块的优势，请参阅其他 TI 出版物（1、2）。集成电感器和其他无源器件后，可实现更小的解决方案尺寸，减少设计计算量以及要进行选择和鉴定的器件数量，并实现可预测的效率性能。但是，所有降压稳压器都存在限制。使用固定电感有助于设置降压电源模块的允许运行边界范围。本应用报告将讨论模块运行限制的驱动因素，以帮助工程师在其设计中更有效地选择和配置电源模块。本应用报告以 TPSM5D1806 双路 6A 输出降压电源模块为例进行讨论。

内容

1 引言.....	2
2 基本降压稳压器操作.....	3
3 最短导通时间和最短关断时间的影响.....	3
4 电流限制的影响.....	4
5 TPSM5D1806 双输出频率注意事项.....	6
6 热性能.....	8
7 总结.....	9
8 参考文献.....	9

插图清单

图 2-1. 基本同步降压稳压器和波形.....	3
图 3-1. 仅考虑最短导通和关断时间时的 TPSM5D1806 输出电压范围 ($V_{IN} = 12V$).....	4
图 4-1. 仅考虑 HS 电流限制时的理想最大负载电流 ($V_{IN} = 12V$, $L = 470nH$).....	5
图 4-2. 仅考虑 HS 电流限值时的最大负载电流 ($V_{IN} = 12V$, $L = 325nH$ (标称值的 70%)).....	5
图 4-3. 仅考虑 HS 电流限值时的最大负载电流 ($V_{IN} = 12V$, $L = 325nH$, $-10\% F_{SW}$).....	5
图 4-4. 负电流限制裕度 ($V_{IN} = 12V$).....	6
图 4-5. TPSM5D1806 效率与输出电流 ($V_{IN} = 12V$).....	6
图 5-1. TPSM5D1806 最大输出电流 ($V_{IN} = 12V$).....	7
图 6-1. TPSM5D1806 热安全工作区 ($V_{IN} = 12V$, $V_{OUT} = 1.8V$).....	8
图 6-2. TPSM84824 热安全工作区 ($V_{IN} = 12V$, $V_{OUT} = 1.8V$).....	8

表格清单

表 1-1. TPSM5D1806 的允许开关频率.....	2
--------------------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

打开任何电源模块数据表，其首页都会宣传模块的负载电流能力以及输入和输出电压范围。具有可选或可调开关频率的模块也会在数据表首页上宣传其频率选项。实际上，由于时序、电流和热限制，并不是所有的输入电压、输出电压、负载电流和开关频率组合都可以实现。必须进一步查看数据表，更好地理解模块的有效运行条件。

电源模块数据表包括表格和图形，总结了不同输入和输出电压范围以及不同开关频率（如果可选择/可调）的最大负载电流能力。TPSM5D1806 的表 1-1 显示了此类表格的一个示例，该器件是一个双路 6A 输出降压电源模块，具有四个可选开关频率：500kHz、1MHz、1.5MHz 和 2MHz。借助该表，可以针对所需的输入到输出电压转换和最大负载电流要求快速确定可能的开关频率选择，而无需手动或通过实验进行任何计算和分析。此外，模块数据表还提供安全工作区 (SOA) 曲线，该曲线显示了在评估板 (EVM) 上测量的最高允许环境温度与负载电流的关系，以帮助量化器件的热性能。

虽然这些数据表和图形对于快速分析和评估器件的功能很有用，但它们可能会让工程师想要更深入地了解模块运行边界的确定方式。了解这些信息有助于工程师更好地为其设计选择、比较和配置电源模块。

表 1-1. TPSM5D1806 的允许开关频率

每通道的输出电 流	开关频率 (kHz)	VIN = 5V		VIN = 12V	
		VOUT 范围		VOUT 范围	
		最小值	最大值	最小值	最大值
6A	500	-	-	0.5	0.8
	1000	0.5	0.8	0.7	1.6
	1500	0.5	1.3	1.0	2.4
	2000	0.6	1.8	1.4	3.2
5A	500	0.5	0.8	0.5	0.9
	1000	0.5	1.8	0.7	2.0
	1500	0.5	3.3	1.0	3.6
	2000	0.6	2.8	1.4	5.5
≤ 4A	500	0.5	0.9	0.5	0.9
	1000	0.5	3.9	0.7	2.0
	1500	0.5	3.5	1.0	3.6
	2000	0.6	2.8	1.4	5.5

2 基本降压稳压器操作

有关降压稳压器基本操作的详细介绍，请参阅其他应用报告 (3)。虽然本文未详细介绍，但了解基本降压操作波形对理解本报告中的讨论很有用。图 2-1 显示了稳态持续导通模式 (CCM) 条件下的基本同步降压功率级以及电感器电流 (i_L) 和开关节点 (v_{SW}) 的简化波形。为简单起见，本报告的分析 and 公式中未考虑死区时间和电阻分量 (例如 MOSFET 导通电阻和电感器直流电阻)。

在导通时间 t_{ON} 期间，高侧 (HS) MOSFET 处于导通状态，低侧 (LS) MOSFET 处于关断状态。在此状态下，电感器上存在正电压 $V_{IN}-V_{OUT}$ ，导致电感器电流上升。在关断时间 t_{OFF} 期间，HS MOSFET 处于关断状态，LS MOSFET 处于导通状态。在开关节点接地的情况下，电感器上的电压为 $-V_{OUT}$ ，导致电感器电流下降。开关周期 t_{SW} 是 t_{ON} 和 t_{OFF} 之和，并且是开关频率 F_{SW} 的倒数。占空比 D 可定义为 $D = t_{ON}/t_{SW}$ 。在实际降压稳压器中，导通和关断时间由降压稳压器的控制环路电路动态设置，然后生成信号并发送给栅极驱动器，从而开启和关闭功率 MOSFET。

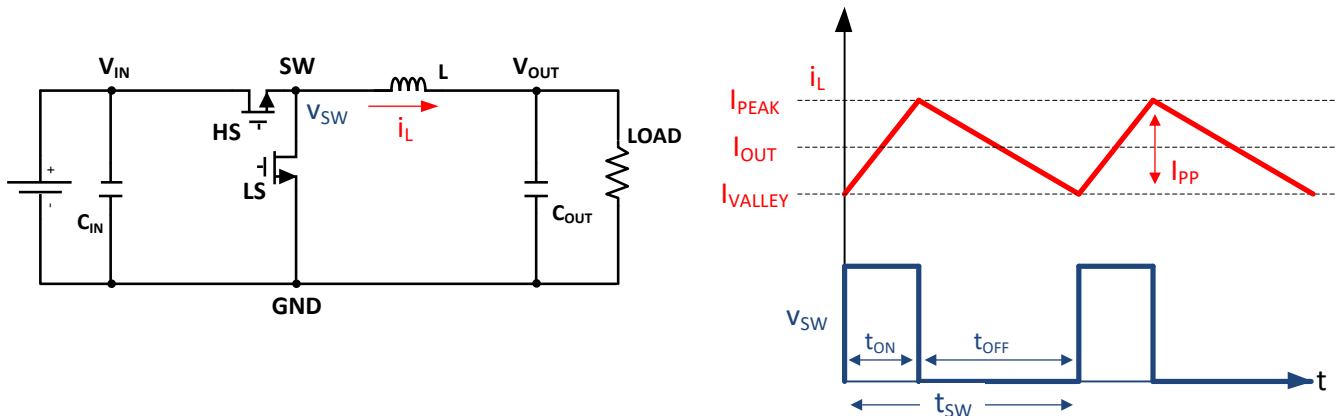


图 2-1. 基本同步降压稳压器和波形

3 最短导通时间和最短关断时间的影响

降压稳压器具有最短导通时间和最短关断时间 (4)，该时间是栅极驱动电路限制、控制和驱动电路延迟以及有意消隐时间共同作用的结果。例如，对于具有 HS MOSFET 电流检测功能的峰值电流模式器件，在其导通转换期间流入 HS FET 的电流会出现浪涌，以便为 LS FET 体二极管的反向恢复提供电荷。FET 导通时电流检测电路中的初始消隐时间可确保干净地显示控制回路和保护电路使用的电流。

稳压器的最短导通时间和最短关断时间将最大值设置为方程式 1 和方程式 2 定义的允许开关频率 (忽略电阻压降)：

$$F_{SWmax,ton} = \frac{D}{t_{ONmin}} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} t_{ONmin}} \quad (1)$$

$$F_{SWmax,toff} = \frac{1-D}{t_{OFFmin}} = \frac{1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}}{t_{OFFmin}} \quad (2)$$

TPSM5D1806 的典型最短导通时间 t_{ONmin} 为 30ns，最短关断时间 t_{OFFmin} 为 150ns。建议为典型值增加一些设计余量，50ns 的 t_{ONmin} 值和 200ns 的 t_{OFFmin} 值是用于分析的较保守数字。以 $V_{IN} = 12V$ 且 $V_{OUT} = 1V$ 的条件为例，最短导通时间允许的最大理论频率为 1.67MHz，最短关断时间允许的最大理论频率为 4.58MHz。虽然在本例中最短关断时间没有施加限制，但最短导通时间确实禁止使用 2MHz 开关频率选项。

为具有固定离散频率选项的器件 (例如 TPSM5D1806) 选择频率选项时，建议同时考虑频率容差。内部振荡器的频率容差为 $\pm 10\%$ ，这意味着频率设置为 1.5MHz 的器件的实际频率可能高达 1.65MHz，接近前面的示例中按照最短导通时间计算出的 1.67MHz 限值。以更高精度与外部时钟进行频率同步可以减小所需的设计裕度，从而避免最短导通和关断时间冲突。如果输入电源具有较宽的容差或未妥善调节，则在分析最短导通时间和关断时间导致的最大允许频率时应分别考虑最大和最小输入电压。

最大频率公式也可以重新整理为**方程式 3**和**方程式 4**，以定义在给定频率和输入电压下最短导通时间允许的最小输出电压和最短关断时间允许的最大输出电压。然后可为输入电压为 12V 的 TPSM5D1806 绘制时序限制导致的输出电压范围，如图 3-1 所示。最小值和最大值钳位到器件的指定输出电压范围 0.5V 至 5.5V。通过此图，可以很容易地读取给定频率下的输出电压范围；例如，在 1MHz 开关频率下，仅考虑最短导通和关断时间以及基本电压范围限制时的理论输出电压范围为 0.7V 至 5.5V。

$$V_{OUT,min} = F_{SW} V_{IN} t_{ONmin} \quad (3)$$

$$V_{OUT,max} = (1 - F_{SW} t_{OFFmin}) V_{IN} \quad (4)$$

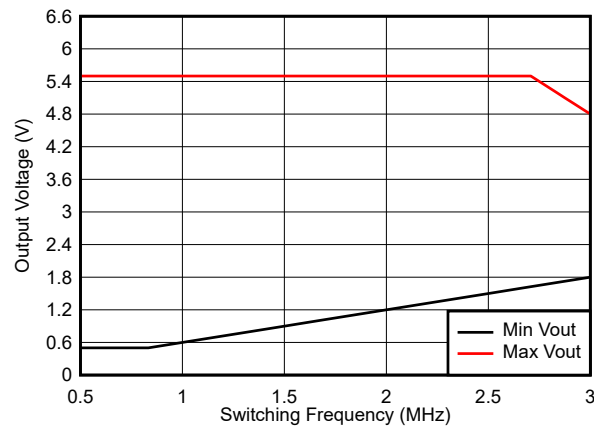


图 3-1. 仅考虑最短导通和关断时间时的 TPSM5D1806 输出电压范围 ($V_{IN} = 12V$)

4 电流限制的影响

每个实际稳压器都需要通过电流限制来保护其元件，例如功率 MOSFET、电感器和接线，这些元件均具有固有的最大电流额定值 (5)。

对于一阶，电感器纹波电流 I_{PP} 和电感器或 HS FET 峰值电流 I_{PEAK} 可通过**方程式 5**和**方程式 6**来计算。当检测到的 FET 或电感器电流达到电流限值时，HS 过流限制通常会做出反应，以关闭降压 HS FET。

$$I_{PP} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} t_{ON} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} \frac{D}{F_{SW}} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} \frac{V_{OUT}}{V_{IN} F_{SW}} \quad (5)$$

$$I_{PEAK} = I_{OUT} + \frac{I_{PP}}{2} \quad (6)$$

假设 HS 过流限值为 $I_{HS,OC}$ ，则最大允许负载电流可通过**方程式 7**计算出。在电感固定的降压电源模块中，影响纹波电流的自由变量是输入电压、输出电压和开关频率。对于低于 50% 的占空比，增大 V_{OUT} 或增大 V_{IN} 将增大 I_{PP} 并减小达到电流限值之前的最大允许负载电流。若要降低电感器纹波电流以降低峰值电流，从而满足固定输入和输出电压要求，以更高的开关频率运行可能是唯一的方法。

$$I_{OUTmax} = I_{HS,OC} - \frac{I_{PP}}{2} \quad (7)$$

TPSM5D1806 是一款使用集成 470nH 电感器的双路 6A 输出电源模块。图 4-1 假定输入电压为 12V，标称电感为 470nH，并据此绘制了在器件四种可选频率设置下的最大负载电流与输出电压的关系曲线。在实际器件中，从达到过流阈值的瞬间到 HS FET 实际关闭之间存在延迟，这会增加有效电流限制和允许的最大负载电流。该延迟将计入最大负载电流曲线。此外，负载电流曲线被钳位到每通道 6A 的最大指定电流。

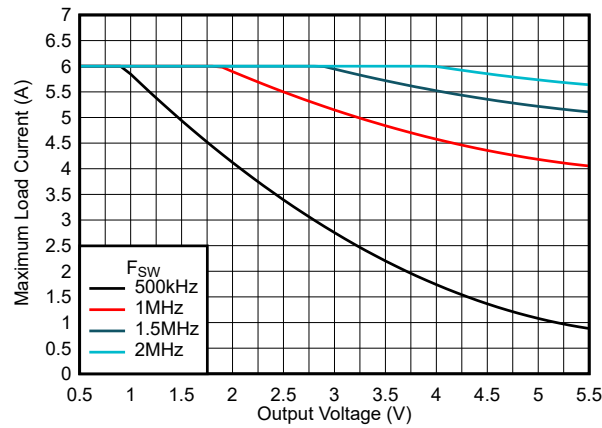


图 4-1. 仅考虑 HS 电流限制时的理想最大负载电流 ($V_{IN} = 12V$, $L = 470nH$)

最大负载电流还受电流限制方面的其他因素影响。实际电感器的标称电感值有一个容差，并有饱和效应，施加电流后会降低有效电感。将 $470nH$ 标称值降低 30% 至 $325nH$ 以补偿这些非理想因素会得到更高的纹波电流并降低最大负载电流，如图 4-2 所示。此外，考虑到内部振荡器的容差，开关频率可能会降低 10%，这会进一步增大纹波电流并降低最大负载电流，如图 4-3 所示。

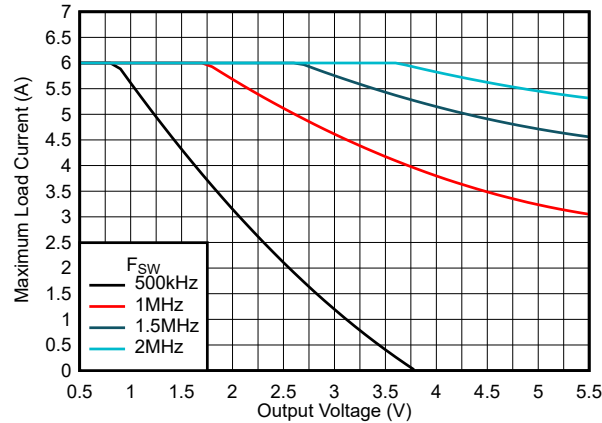


图 4-2. 仅考虑 HS 电流限值时的最大负载电流 ($V_{IN} = 12V$, $L = 325nH$ (标称值的 70%))

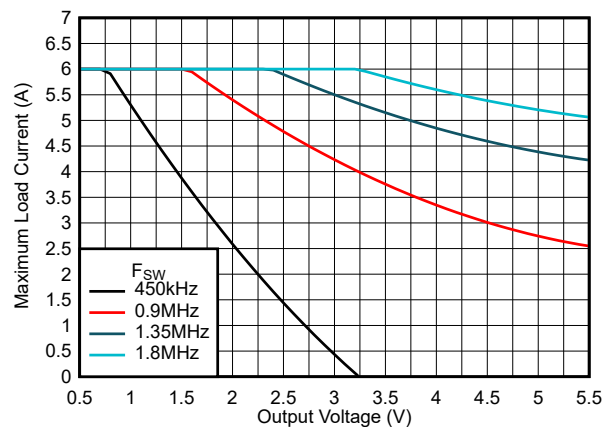


图 4-3. 仅考虑 HS 电流限值时的最大负载电流 ($V_{IN} = 12V$, $L = 325nH$, $-10\% F_{sw}$)

大多数现代同步降压转换器和模块还具有负电流限制或灌电流限制 $I_{SINK,OC}$ 。在空载条件下，对于在强制持续导通模式 (FCCM) 下运行的器件 (例如 TPSM5D1806)，电感器谷值电流将变为负值。如果使用的开关频率太低，则空载时的稳态电感器电流纹波可能会很大，导致谷值电流超过灌电流限值。因此，会对最小开关频率施加灌电流

限制。灌电流限制的裕度可通过**方程式 8** 计算出来，并且**图 4-4** 显示了 $V_{IN} = 12V$ 时的曲线。对于目标输出电压，必须适当选择开关频率，以使灌电流限制产生正裕度。

$$I_{SINK,MARGIN} = I_{SINK,OC} - \frac{I_{PP}}{2} \quad (8)$$

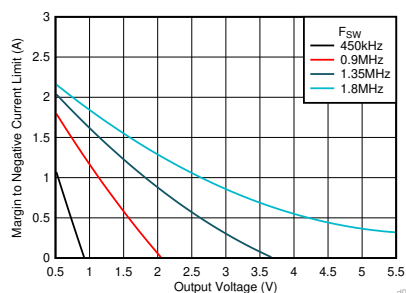


图 4-4. 负电流限制裕度 ($V_{IN} = 12V$)

达到更高的开关频率以避免电流限制冲突的折衷方法通常是降低效率。TPSM5D1806 数据表显示了多个开关频率下 12V 输入和 1.8V 输出的效率曲线。1MHz 和 1.5MHz 的 1.8V 效率曲线在负载电流低于 3A 时有所不同，由于开关或交流损耗比 1MHz 的高，1.5MHz 曲线显示了较低的效率。

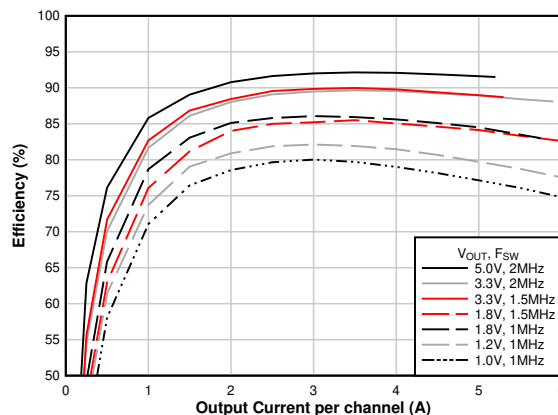


图 4-5. TPSM5D1806 效率与输出电流 ($V_{IN} = 12V$)

5 TPSM5D1806 双输出频率注意事项

由最短导通时间、最短关断时间和电流限制引起的频率限制都会影响**表 1-1** 中总结的运行边界。**图 5-1** 中还针对 $V_{in} = 12V$ 以图形的形式显示了同样的信息。

TPSM5D1806 的两个通道在双输出和双相工作模式下以相同的选定频率且彼此相差 180° 的相位运行。在双输出模式下，需要选择一个可以同时满足两个输出的电压和负载电流要求的公共频率。

根据**图 5-1**，可以通过找到两个输出的电压/电流点所在的频率曲线来确定有效的开关频率选项。例如，对于 $V_{IN} = 12V$ 并以 6A 输出 1.8V 和以 5A 输出 3.3V 的应用，可以使用 1.5MHz 或 2MHz 频率设置。图中还显示，并非所有输出电压和负载电流的组合都可以组合在一个 TPSM5D1806 中。例如，在一个 TPSM5D1806 中，不存在有效的频率来支持 $V_{IN} = 12V$ 以及 0.9V (6A 时) 和 3.3V (6A 时) 输出。虽然 2MHz 设置将会支持 3.3V 电源轨，但 0.9V 电源轨将与 $V_{IN} = 12V$ 的最短导通时间冲突。因此，在构建电源树时必须考虑一些因素，以便尽可能利用双输出模块通道。

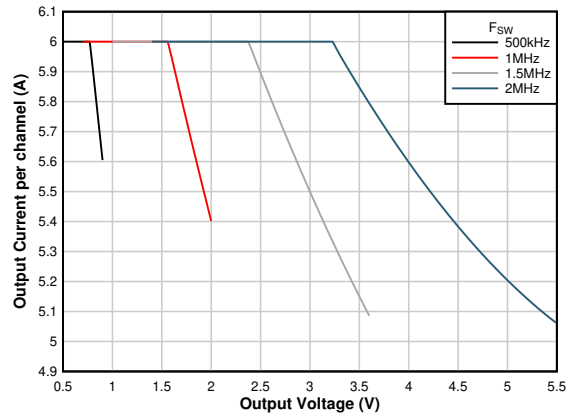


图 5-1. TPSM5D1806 最大输出电流 ($V_{IN} = 12V$)

6 热性能

若要确保模块安全运行，除了时序和电流限制之外，热性能也是需要考虑的一个关键因素。降压电源模块将开关模式电源中的主要功耗元件（电源开关和磁性元件）全部集成到一个封装中。

TI 电源模块数据表提供了安全工作区 (SOA) 曲线，如图 6-1 所示。这些曲线显示了允许的最高环境温度与负载电流的关系，可帮助用户对特定器件的热性能进行量化。模块 SOA 测量通常在模块 EVM 上执行。对于 TPSM5D1806，需要注意的是，SOA 曲线显示了在两个通道都被启用并设置为相同输出电压，而且两个通道均加载（例如， $I_{OUT1} = I_{OUT2}$ ）的情况下运行模块。这意味着 SOA 曲线还可用于衡量双相操作中的热性能，在双相操作中，两个 TPSM5D1806 通道连接在一起可提供高达 12A 的输出电流。图 6-1 的 x 轴只需加倍便可获得等效双相条件的有效 SOA 图表。

由于热限制，人们可能认为模块越大，它可以提供的输出功率和电流就越大。但情况可能并非总是如此，因此有必要查看不同模块的 SOA 曲线以比较它们的电流降额和环境温度。例如，图 6-1 表明采用双相配置的 TPSM5D1806 可在高达 90°C 的无气流环境温度下，以 $V_{IN} = 12V$ 和 $V_{OUT} = 1.8V$ 提供高达 8A（每通道 4A）电流。同时，图 6-2 表明，在相同条件下，更大单输出的 TPSM84824 仅可在高达 85°C 的温度下提供 8A 电流。TPSM5D1806 采用 5.5mm x 8mm x 1.8mm (79.2mm³) QFN 封装，比采用 7.5mm x 7.5mm x 5.3mm (298mm³) 开放式框架 QFN 封装的 TPSM84824 尺寸小。

需要注意的是，进行此比较时，TPSM84824 SOA 是在 4 层板上进行测量的，而 TPSM5D1806 SOA 是在 6 层板 TPSM5D1806EVM 上进行测量的。热性能取决于 PCB 布局，因此不应将数据表 SOA 曲线解释为代表模块在任何布局中的热性能；它仅指导用户了解使用类似于 EVM 的布局和叠层可能实现的性能。估计 TPSM84824 在此条件下的功耗约为 1.9W，并会在 6 层板与 4 层板 (6) 上造成约 2°C/W 的降温，因此可以将 TPSM84824 允许的最高环境估算温度调整为大约 89°C。即使调整后，采用较小封装的 TPSM5D1806 仍能提供与 TPSM84824 相当的输出能力。

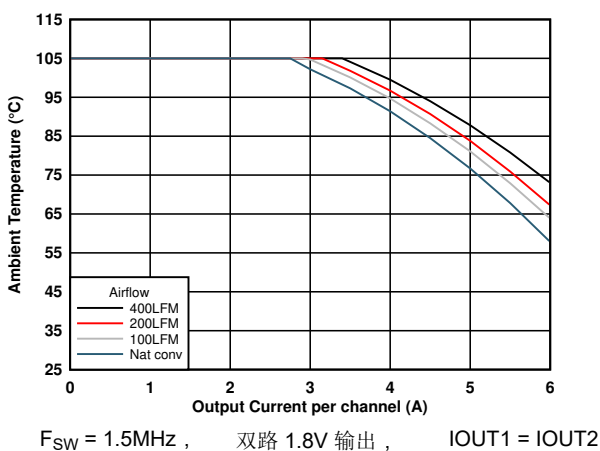


图 6-1. TPSM5D1806 热安全工作区 ($V_{IN} = 12V$, $V_{OUT} = 1.8V$)

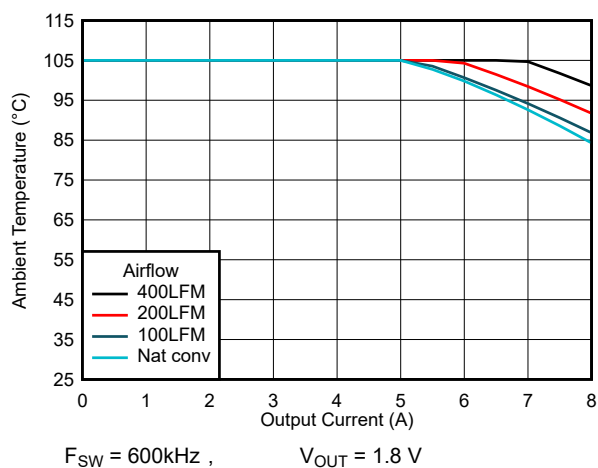


图 6-2. TPSM84824 热安全工作区 ($V_{IN} = 12V$, $V_{OUT} = 1.8V$)

7 总结

降压电源模块为系统工程师提供很多优势，例如较小的解决方案尺寸和更短的产品上市时间。TI 电源模块采用多功能设计，应用范围广泛。然而，所有电源模块均具有运行限制。本应用报告重点介绍了时序、电流限制和热性能等因素，这些因素通常决定模块的有效运行范围边界。凭借这些知识，系统工程师可以在选择、比较和设计降压电源模块时更好地进行设计权衡。

8 参考文献

TI.com 上提供了以下材料：

1. 德州仪器 (TI), 《物超所值 - 降压转换器与降压电源模块比较简介》, 应用报告。
2. 德州仪器 (TI), 《使用电源模块相对于分立式设计的真正优势》, 培训。
3. 德州仪器 (TI), 《了解开关模式电源中的降压功率级》, 应用报告。
4. 德州仪器 (TI), 《降压转换器简介：最短导通时间和最短关断时间运行》, 培训。
5. 德州仪器 (TI), 《了解限制》, 应用报告。
6. 德州仪器 (TI), 《采用直流/直流电源模块的实用性热设计》, 应用报告。

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司