

刘文涛 Jackey Liu

FAE AA1

摘要

LM5190 作为峰值电流模式 (Peak Current Control) 同步降压控制器, 未配置强制脉冲宽度调制 (FPWM) 时默认工作于 PFM 模式。实际应用中发现, 即使在负载电流未达到断续导通模式 (DCM) 阈值的情况下, LM5190 也会出现 PWM 与 PFM 混合工作的状态, 表现为开关频率显著低于设定值或峰值电流控制值不确定的现象。这是 LM5190 的固有机理所致, 并非异常现象。本文将阐述 LM5190 PWM 与 PFM 模式的工作机制, 分析混合工作现象的触发条件与核心原因, 通过 LM5190 EVM 开展实验验证负载电流、COMP 电压、PFM 触发等关键因素的影响, 为同类应用的稳定性设计提供参考。

内容

1 引言 : LM5190 的异常降频.....	2
2 LM5190 工作机制分析.....	3
3 Turning point 1~3: LM5190 降频工作现象分析.....	6
4 Turning point 3~Fully PFM entering point: LM5190 PFM/PWM 混合工作现象分析.....	9
5 Entering PFM: LM5190 PFM 工作现象分析.....	10
6 小结.....	11
7 参考文献 :	11

插图清单

图 1-1. LM5190 与 TAS6754 协同 Class-H 工作.....	2
图 1-2. LM5190 降频工作现象.....	2
图 2-1. LM5190 峰值电流控制环路.....	3
图 2-2. LM5190 工作在 eco mode 和 FPWM mode 的效率.....	4
图 2-3. LM5190 电感电流峰值和 COMP 电压的关系.....	5
图 3-1. LM5190 负载电流为 2.264A 时的实验结果.....	6
图 3-2. LM5190 负载电流为 2.224A 时的实验结果.....	6
图 3-3. LM5190 负载电流为 1.855A 时的实验结果.....	7
图 3-4. LM5190 负载电流为 1.742A 时的实验结果.....	8
图 3-5. LM5190 负载电流为 1.876A 时的实验结果.....	8
图 4-1. LM5190 负载电流为 1.407A 时的实验结果.....	9
图 4-2. LM5190 负载电流为 0.991A 时的实验结果.....	9
图 5-1. LM5190 负载电流为 0.589A 时的实验结果.....	10

1 引言：LM5190 的异常降频

LM5190 作为一款被广泛使用的 TI 宽输入电压范围同步降压控制器，由于具有高精度恒压-恒流 (CC-CV) 控制环，被广泛应用于超级电容能量备份、储能系统、USB power delivery、服务器电池备份单元 (BBU)、以及音频功放的供电电源等场景中。一种典型的 LM5190 配合 TAS6754 进行 Class-H 工作的系统设计如 图 1-1 所示。

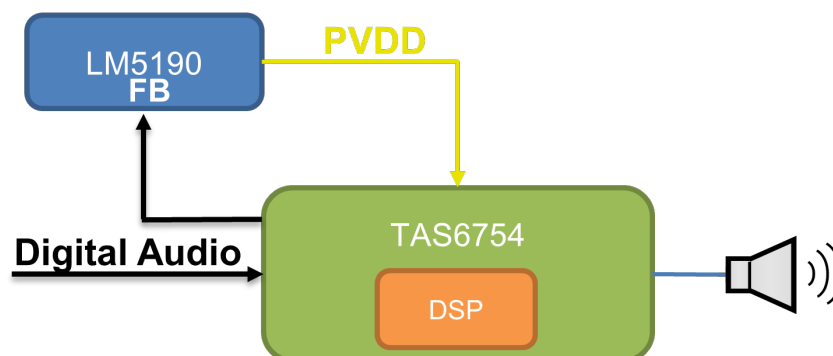


图 1-1. LM5190 与 TAS6754 协同 Class-H 工作

LM5190 通过 IMIN Selector 来选择其工作与 CC 环还是 CV 环，在负载电流不越限，距离设定的 ISET 较远时 LM5190 会工作在 CV 环，此时当负载电流明显大于 DCM 的界限值时 LM5190 理论上应工作在 PWM 模式，输出电压的频率恒定为由 RT 设定的设定值。但实际测试时，注意到当负载电流不够大的时候 LM5190 输出电压会出现明显的降频，如 图 1-2 所示，此时 LM5190 的为 EVM 默认的 54.9k，设定的输出频率为 433kHz，图 1-2 中的输出频率为 148.5kHz，远低于设定值。

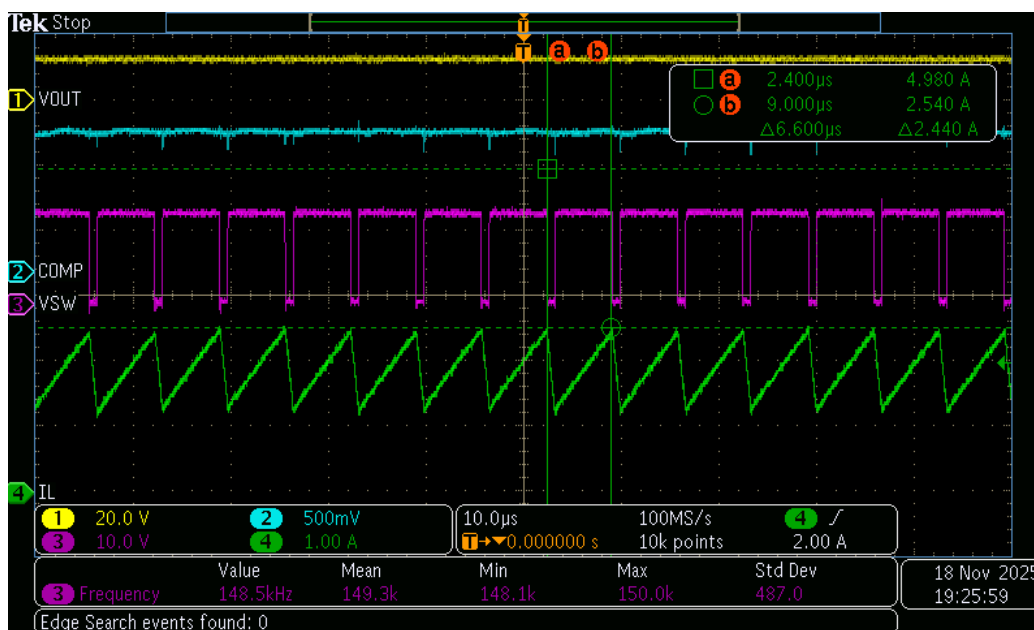


图 1-2. LM5190 降频工作现象

2 LM5190 工作机制分析

LM5190 采用峰值电流控制的控制架构，LM5190 峰值电流控制通过直接采样电感峰值电流实现对开关管的精准控制，是其稳定工作的基础。核心控制逻辑是通过 ISNS+ 和 VOUT 引脚连接外部采样电阻 R_s ，实现对电感电流的实时采样，采样信号经过内部放大器（增益典型值为 10V/V）放大后，与 COMP 引脚输出的补偿电压进行比较——当采样电流达到 COMP 电压对应的电流峰值时，PWM 比较器控制开关管的上管关断、下管导通，完成本次开关周期的控制。控制环路如图 2-1 红色框选部分所示。

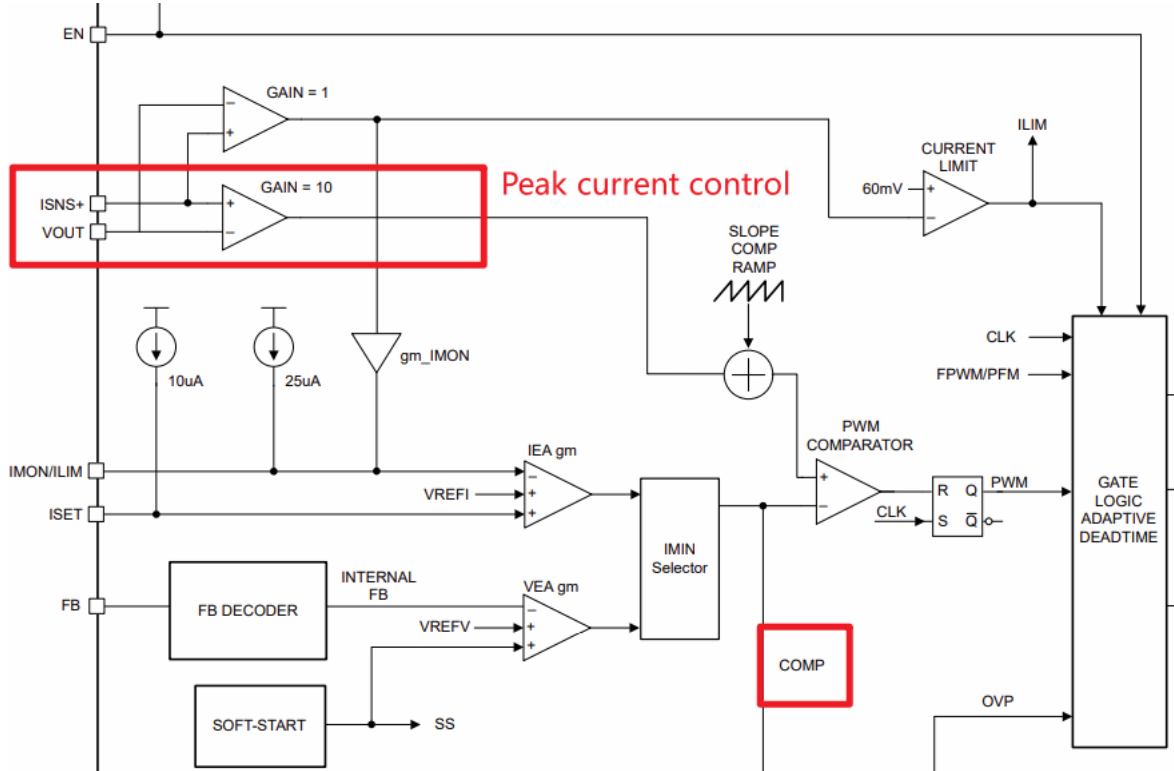


图 2-1. LM5190 峰值电流控制环路

LM5190 通过 FPWM/SYNC 引脚配置两种不同的工作模式，适配不同负载的工作场景。LM5190 data sheet 中描述了当其 FPWM/SYNC 引脚连接到 VCC 时，LM5190 会工作在 FPWM mode；而当 FPWM/SYNC 引脚连接到 AGND 时，LM5190 会工作在 PFM mode。PFM 的工作原理是：COMP 电压与负载电流和电感电流峰值成正比，当负载电流降低导致 COMP 电压小于一定值时，device 会对 COMP 电压进行钳位，并同时关断上下管，进入不动作的状态，此时输出电容为负载供电，当输出电压跌落至一定值时，device 会通过 FB 检测到这种跌落，会自动拉高 COMP 值使得上管重新动作，待 COMP 再次跌回此时负载电流对应的钳位值，再次同时关闭上下管，完成一个开关周期。

PFM 会极大地改善 LM5190 在轻载工作时的效率，LM5190 分别工作在 FPWM 和 PFM 时的效率如图 2-2 所示。

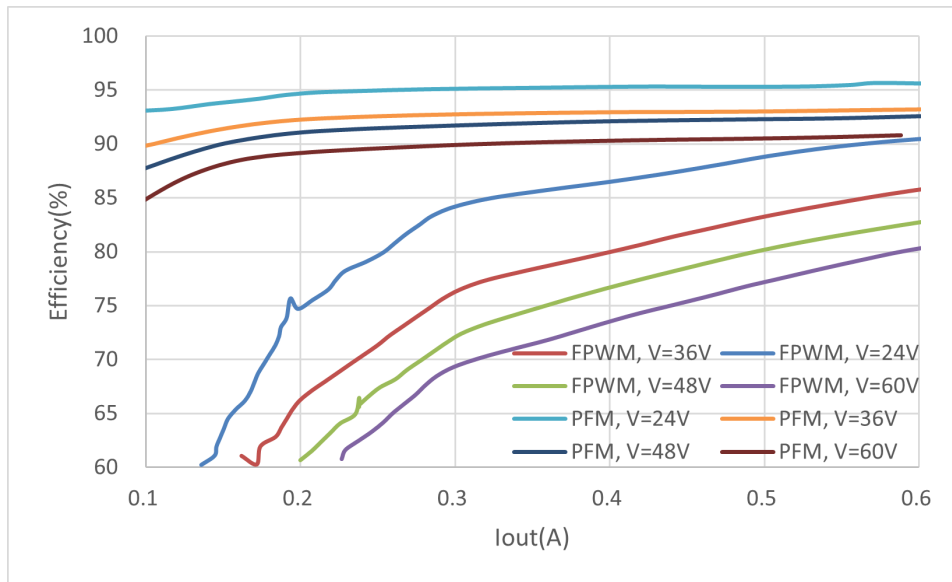


图 2-2. LM5190 工作在 eco mode 和 FPWM mode 的效率

理论上，eco mode 的控制逻辑并不复杂，由前述内容知 LM5190 的电感电流峰值与 COMP 电压成正比，当电感电流的峰值小于一定值即 COMP 电压低于一定值时，LM5190 会进入 eco-mode，实测的 LM5190 电感电流峰值和 COMP 电压与负载电流的关系如 图 2-3 所示。可见：

1. 随着负载电流的减小，Vcomp 和 ILpeak 都会减小，对于 LM5190 来说，当 Vcomp 小于 0.3V 左右时会把 Vcomp 钳位在 0.3V，进入 eco-mode 的工作状态。
2. 随着负载降低，ILpeak 会存在几个转折点，比较明显的是在负载电流为 2.251A、1.849A、1.608A 时，在这三个转折点，负载电流降低 Vcomp 会随之降低，但是 ILpeak 会先减小再增大，原因是 LM5190 具有 Minimum peak current limit threshold，当 LM5190 的峰值电流小于最小值时 LM5190 会通过降低 CLK 频率的方式增大上管的充电周期以拉高 ILpeak 值，最小的电感电流峰值可由 式 1 计算得出。

$$I_{Lpeak_min} = \frac{V_{CS-TH-MIN}}{R_{CS(EVMdefault)}} = \frac{12mV}{5m\Omega} = 2.4A \quad \# (1)$$

由图可知，在 LM5190 EVM 的实际测试中，LM5190 所约束的 minimum peak current 约为 2.7A，实际的电感电流纹波可由 式 2 计算得到，由该式可知在输出频率不变的情况下，随着 Iload 降低 ILpeak 会降低，结合 图 2-3 可知，当 ILpeak 要低于 minimum peak current 即 2.7A 时，LM5190 会通过降低 CLK 频率使 ILpeak 升高，保持 ILpeak 钳位在 2.7A，只有在 Vcomp 钳位在 0.3V 完全进入 PFM 后，才会停止这种对 ILpeak 的补偿，降低其峰值电流控制的峰值。这种补偿机制也是造成后文所述的 LM5190 降频、PFM/PWM 混合工作、临界点多峰值电流控制的本质原因。

$$I_{Lpeak} = I_{load} + \frac{V_{in} - V_{out}}{2Lf_{sw}} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad \# (2)$$

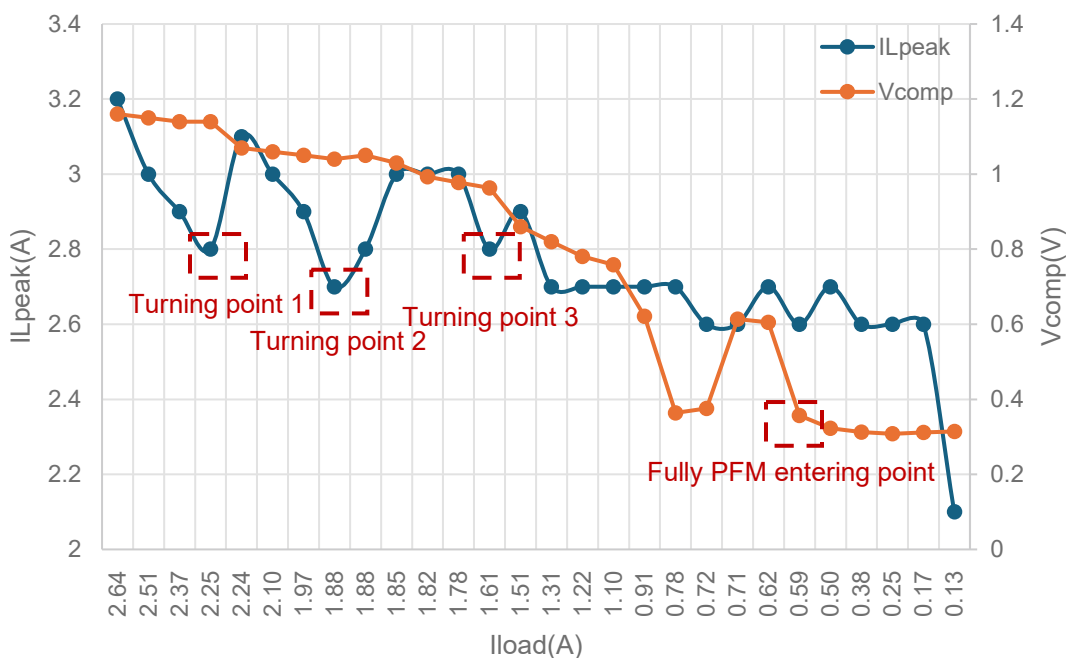


图 2-3. LM5190 电感电流峰值和 COMP 电压的关系

后续章节将按负载电流从大到小的顺序给出几个典型的转变点的现象并进行分析，第一个转变点到第二个转变点之间，LM5190 表现出典型的降频工作状态，将在第三章对该状态进行介绍；第二个到第三个转变点之间也工作在这种状态；第三个转变点之后，完全进入 PFM 之前，LM5190 工作在 PFM PWM 混合工作的状态，将在第四章对该状态进行介绍；最后在 Vcomp 钳位在 0.3V 后，完全进入 PFM 的工作状态，将在第五章对该状态进行介绍。

3 Turning point 1~3: LM5190 降频工作现象分析

在实验测试时，调节负载电流为 2.264A 和 2.224A 分别得到 图 3-1 图 3-2 的实验结果。

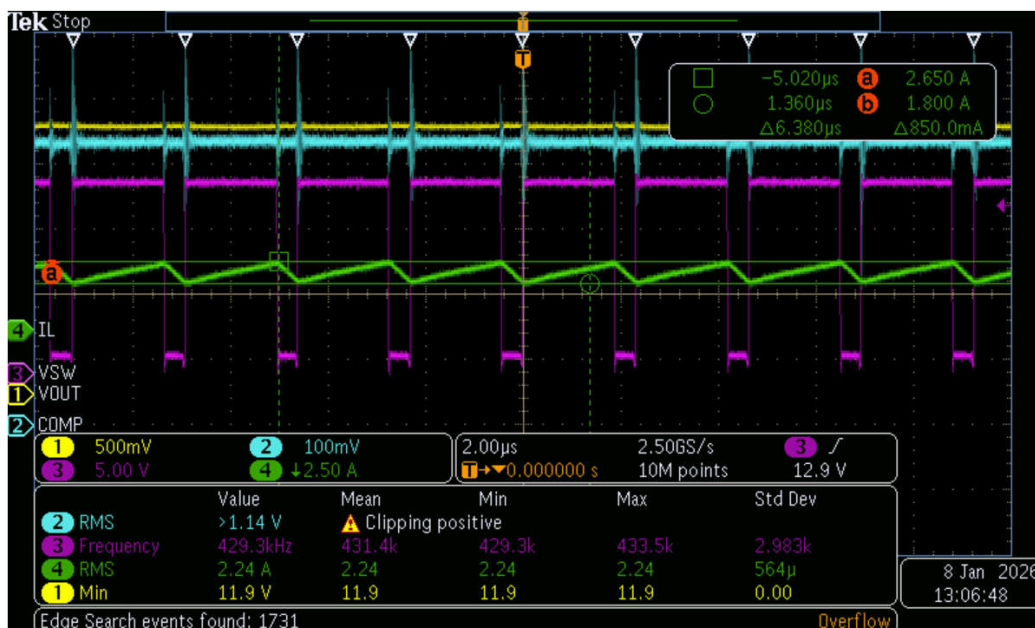


图 3-1. LM5190 负载电流为 2.264A 时的实验结果



图 3-2. LM5190 负载电流为 2.224A 时的实验结果

由 图 3-1、图 3-2 可知，在第一个转变点，即负载电流大于 2.264A 时，LM5190 正常工作在 PWM mode，若调节负载电流低于 2.264A，结合 式(1)、式(2)可知，如果仍维持设定的开关频率 433kHz (EVM default)，LM5190 的 ILpeak 会小于其设定的最小值 2.4A (本实验中此值为 2.6A)，此时 LM5190 会通过降低 CLK 频率补偿 ILpeak 值，在负载电流只降低很小的值的情况下大幅拉高 ILpeak 值，并且由 图 2-3 可知此时 Vcomp 仍在随着负载电流降低而降低，这种补偿不是通过拉高 Vcomp 实现的。

由于 LM5190 采用峰值电流控制模式，这种控制方式 device 的上管关断逻辑是电感电流达到 peak 值，而开通逻辑则是 CLK 的信号为高电平，通过 RS 触发器 set 上管开通，因此当 LM5190 的 CLK 频率降低，整个开关周期的正半周期和负半周期都拉长，从而可以拉高 IL 的 peak 值使其大于限制的最小值。

在第二个转变点到第三个转变点之间，LM5190 亦工作在这种由于补偿了峰值电流控制的峰值而造成工作频率降低的状态，并且当负载电流位于对应两个峰值电流的负载电流之间时，如图 8 所示的负载电流为 1.855A 时的情况，此时负载电流位于 1.876A 和 1.849A 之间，由图 2-3 可知当负载电流为 1.876A 和 1.849A 时对应的峰值电流分别为 2.8A 和 3A，导致负载电流为 1.855A 时会出现电流峰值在两个值之间不确定地交替控制的现象，此时输出电压的频率会更加不确定，如图 3-3 所示，可以明显看出此时 LM5190 的峰值电流控制存在两个峰值——2.7A，3.0A。

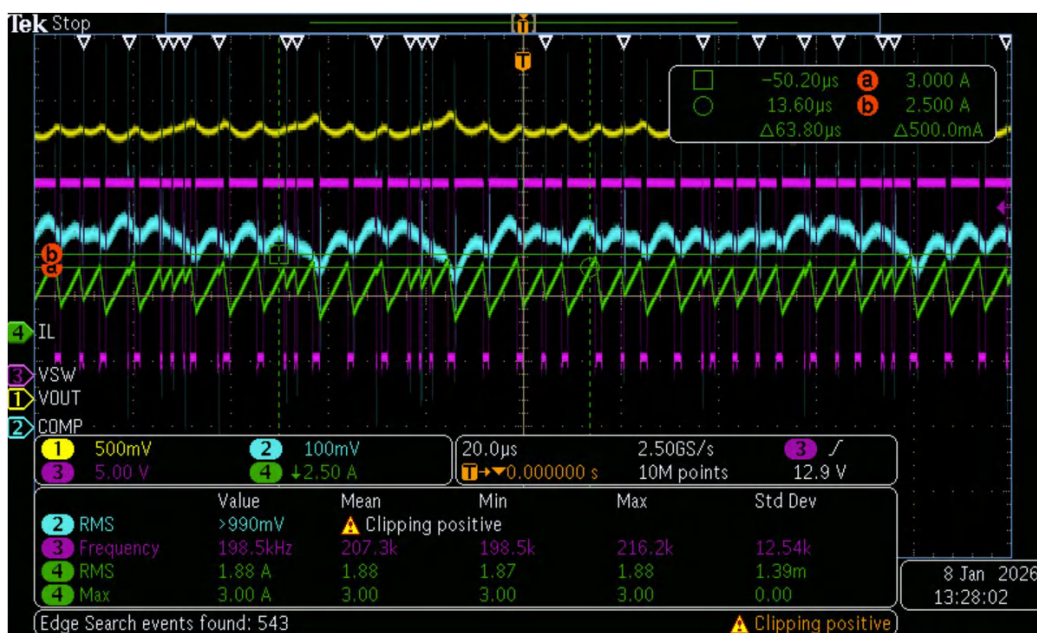


图 3-3. LM5190 负载电流为 1.855A 时的实验结果

当负载电流为 1.742A 和 1.876A 时，LM5190 的工作状态如图 3-4，图 3-5 所示。由图 3-4，图 3-5 可知，LM5190 在负载电流为 1.742A 和 1.876A 时的峰值电流分别为 2.7A 和 3.0A。因此可知当负载电流为 1.835A 时，LM5190 介于负载电流为 1.742A 和 1.876A 的中间态或不定态，其 CLK 频率不固定导致两个峰值电流为负载电流为 1.742A 和 1.876A 时 LM5190 的峰值电流。

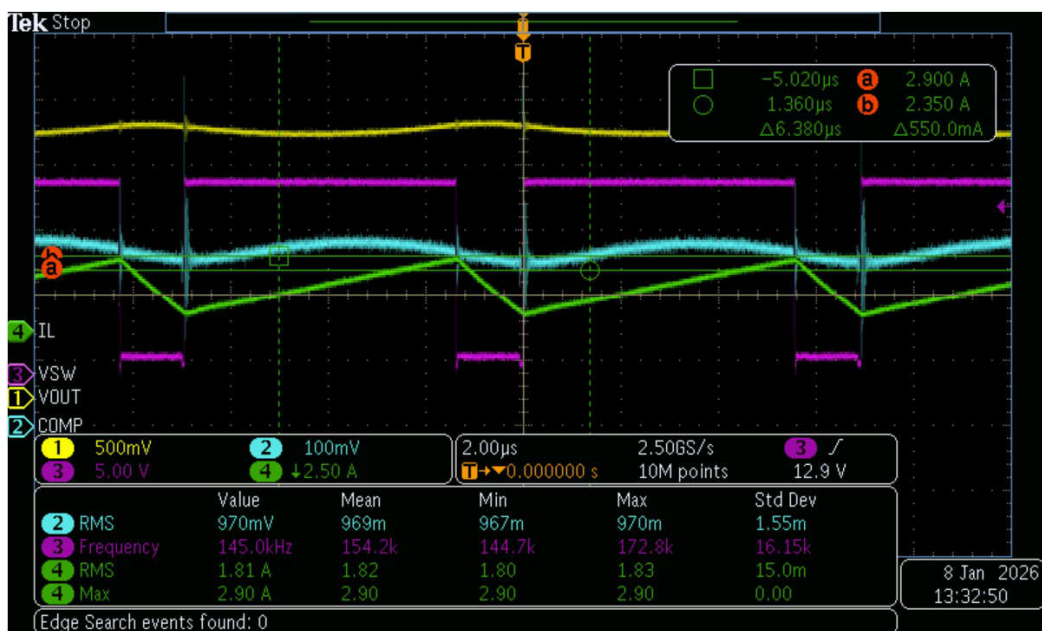


图 3-4. LM5190 负载电流为 1.742A 时的实验结果

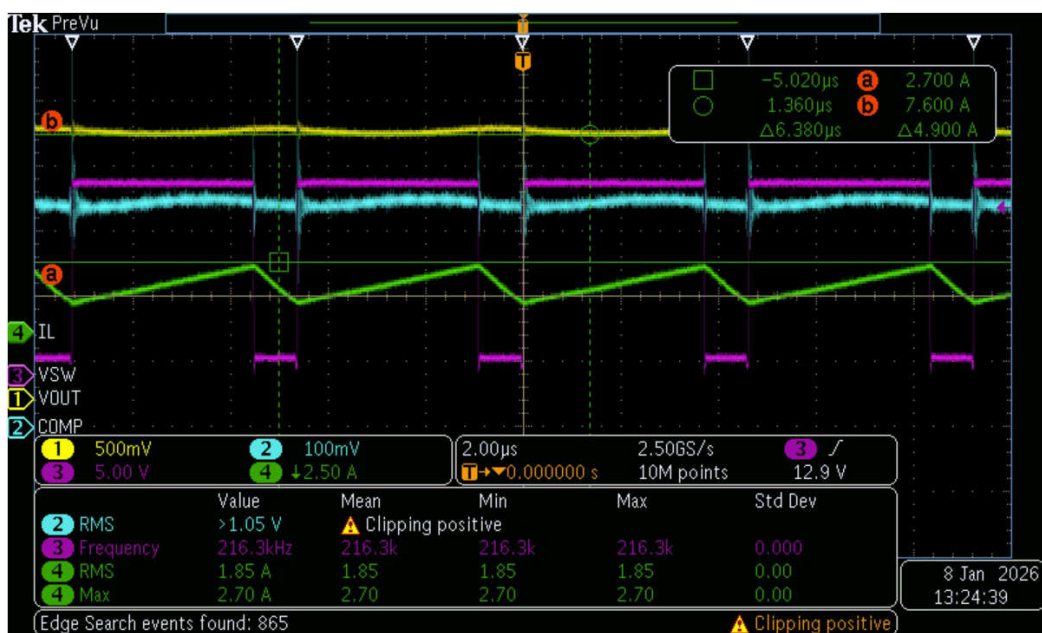


图 3-5. LM5190 负载电流为 1.876A 时的实验结果

4 Turning point 3~Fully PFM entering point: LM5190 PFM/PWM 混合工作现象分析

当负载电流小于 Turning point 3 的电流时，LM5190 会进入 PFM 和 PWM 混合工作的状态。由前述内容知 PFM 上管关断的逻辑是 COMP 电压低于钳位值，开通逻辑是输出电压低于一定的门限值，在实际测试中 LM5190 这一门限值为 0.99 的输出电压设定值。而 PWM 的开通逻辑是 CLK 信号高电平，关断逻辑是电感电流达到峰值。

此时 LM5190 的典型工作状态如 图 4-1 所示，此时负载电流为 1.407A，可以明显看出既有在输出电压下降过程中，低于约 12V 时的开通，如图中白色虚线标注的开通点，这种开通逻辑是典型的 PFM 开通，在 Turning point 3 之前不曾出现，如 图 3-2 - 图 3-5 所示；也有在输出电压已处于上升状态，不符合 PFM 开通逻辑的开通，这种开通逻辑就是典型的 PWM 开通，由于 CLK 的上升沿到来导致的开通。

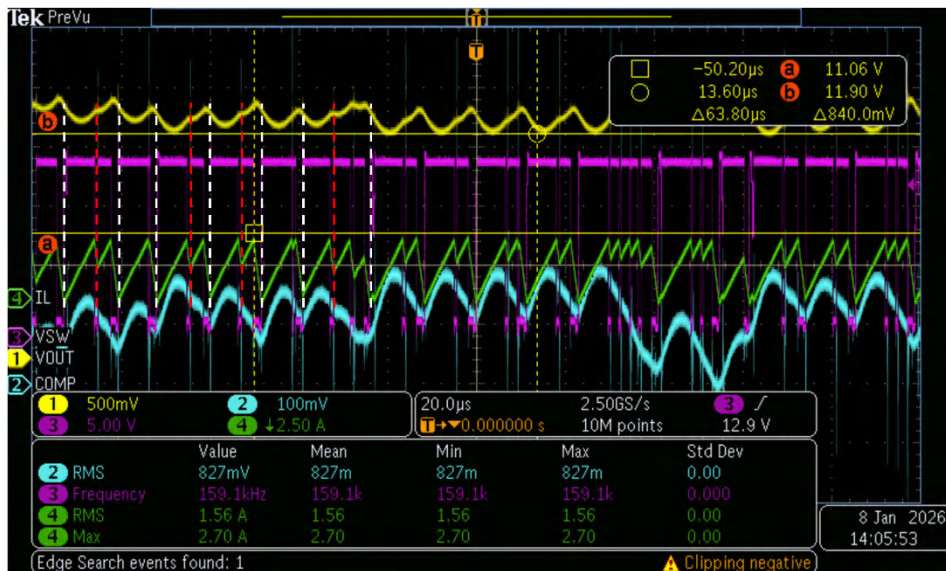


图 4-1. LM5190 负载电流为 1.407A 时的实验结果

当负载电流为 0.991A 时，这种 PWM 和 PFM 控制逻辑共同发挥作用的现象更加明显，如 图 4-2 所示，观察其输出电压和电感电流可以看出，此时明显 LM5190 会存在两种开通逻辑，如前所述，图 4-2 中白色虚线标注的为 PFM 开通，红色虚线标注的为 PWM 开通。

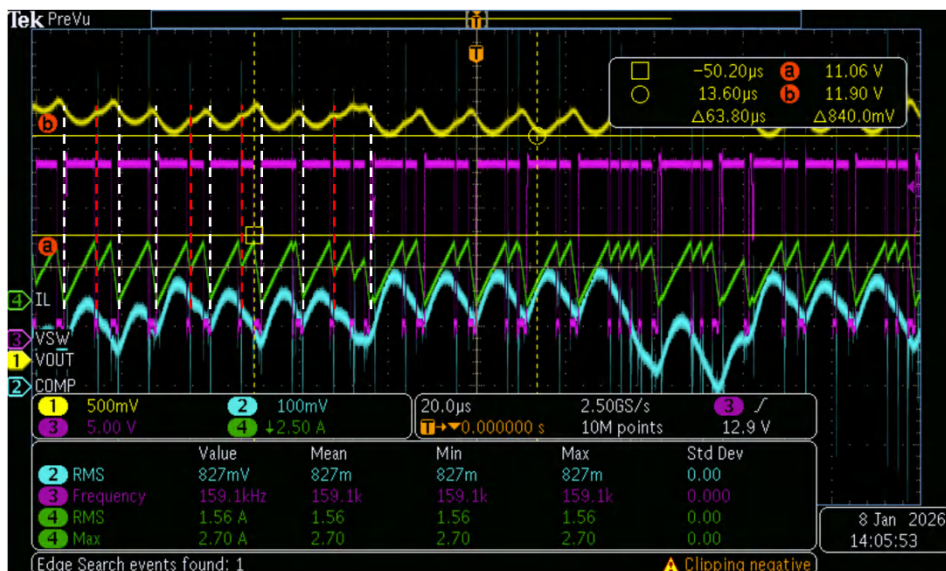


图 4-2. LM5190 负载电流为 0.991A 时的实验结果

5 Entering PFM: LM5190 PFM 工作现象分析

当负载电流继续下降至小于 0.6A 左右时，COMP 电压降低到 300mV 左右，此时 LM5190 工作在完全的 PFM，上管开通和关断的逻辑均符合 PFM 的控制逻辑，即在输出电压低于约 $0.99 \times$ 设定值时开通，在 V_{comp} 小于 300mV 同时关闭上下管。如图 5-1 所示，图中红色虚线标出了上管的开通时刻，白色虚线标出了上管下管同时关断的时刻，可以发现上管在 V_{out} 下降至一定值时开通，在 V_{comp} 小于一定值时关断，每一个时刻的开通和关断都符合 PFM 的控制逻辑，PWM 的控制逻辑不再出现。



图 5-1. LM5190 负载电流为 0.589A 时的实验结果

6 小结

LM5190 工作于 PFM 和 PWM mode 混合工作的状态是 LM5190 的固有机制，该固有机制会导致在一些负载电流的临界条件下 LM5190 开关频率显著低于设定值或峰值电流值不确定的异常现象，因此该现象并非故障现象或 DCM 现象。这种混合工作状态发生在中等负载区间，可以通过配置为 FPWM mode 避免。因此建议根据实际需求选择工作模式，如果对频率稳定性要求高的场景应配置为 FPWM mode，避免在中等负载时其输出频率仍不稳定。

7 参考文献：

1. LM5190 datasheet
2. LM5190EVM User Guide
3. Understanding ECO-MODE™ Operation

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025