

Power Stage IMON 跑飞现象及解决方案

Nison Wang

North West China OEM Team

摘要

主板供电是服务器中非常重要的部分，它负责将电源模块 PSU 输出的 12V 电压转化为 CPU、内存、PCH、BMC 及其他电路所需的适当电压^[1]。这部分电路由多个不同的 VR 电路组成，以为不同的设备提供不同的电压。VR 电路由 VR Controller、Power Stage 及它们外围的电容电感电阻组成。Power Stage 内部的控制 FET，同步 FET 和门级驱动可以实现功率转换，同时还具有故障上报，温度上报和电流检测（IMON）等功能。

本文主要研究电流检测（IMON），以 CSD95484 为例，首先介绍了 IMON 的基本原理，然后详细阐述了 IMON 跑飞现象及产生的原因，最后提供了规避方案，以求为其他 VR 设计者提供借鉴。

目录

1	CSD95484 IMON 的基本原理	2
2	IMON 跑飞现象及说明	5
3	CSD95484 设计注意事项	8
4	小结	9
	参考文献	9

图例

图 1	VR 典型应用框图	2
图 2	CSD95484 内部功能框图	2
图 3	CSD95484 current sense 详细框图	3
图 4	CSD95484 电感电流模拟级	3
图 5	DC Reset 波形	4
图 6	无 DC Reset 时的波形	4
图 7	有 DC Reset 时的波形	5
图 8	CSD95484 的 IMON “跑飞” 波形	6
图 9	CSD95484 的 IMON 两段“跑飞” 波形	7
图 10	CSD95484 的 IMON 正常波形	7
图 11	CSD95484 的 IMON “跑飞” 及“恢复” 波形	8

1 CSD95484 IMON 的基本原理

图 1 为 VR 典型应用框图，TPS53685 为 VR Controller，其通过 PWM 信号控制 CSD95484 内部控制 FET，同步 FET 的开通关断。CSD95484 的电流反馈类型为电压型，因此有两个 Pin 与 IMON 是紧密相关的：IOUT Pin 和 REFIN Pin。CSD95484 检测后端电感的实时电流，然后将电感电流转换为成比例的电压，通过 REFIN 和 IOUT 传递给 VR Controller，VR Controller 可以借助此电流信息进行环路控制或过流保护。IOUT 与 REFIN 的电压差与电感电流成正比，因此电感电流可以按照如下公式计算出来：

$$I_L = \frac{(IOUT - REFIN)}{5mV/A}$$

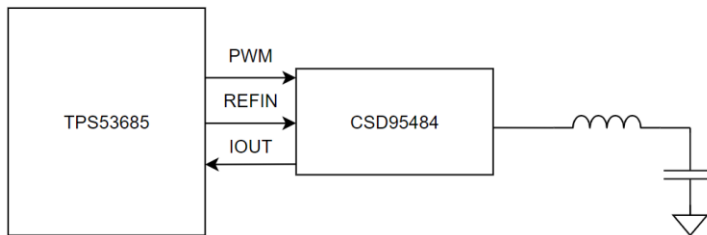


图 1 VR 典型应用框图

图 2 为 CSD95484 内部功能框图^[2]，我们只需关注 Current Sense 部分，CSD95484 并不会直接检测后端电感的实时电流，而是去检测流经同步 FET 的电流，因为在同步 FET 导通时，电感电流全部从同步 FET 流过。因此，CSD95484 通过检测同步 FET 漏极和源极两端的电压去反映电感电流，如果认为同步 FET 的 $R_{ds(on)}$ 是恒定的，那么 V_{ds} 和 I_L 是成正比的。下图中 Current Sense 电路将 V_{ds} 处理后通过 REFIN 和 IOUT 传递给 VR Controller。

$$V_{ds} = I_L * R_{ds(on)}$$

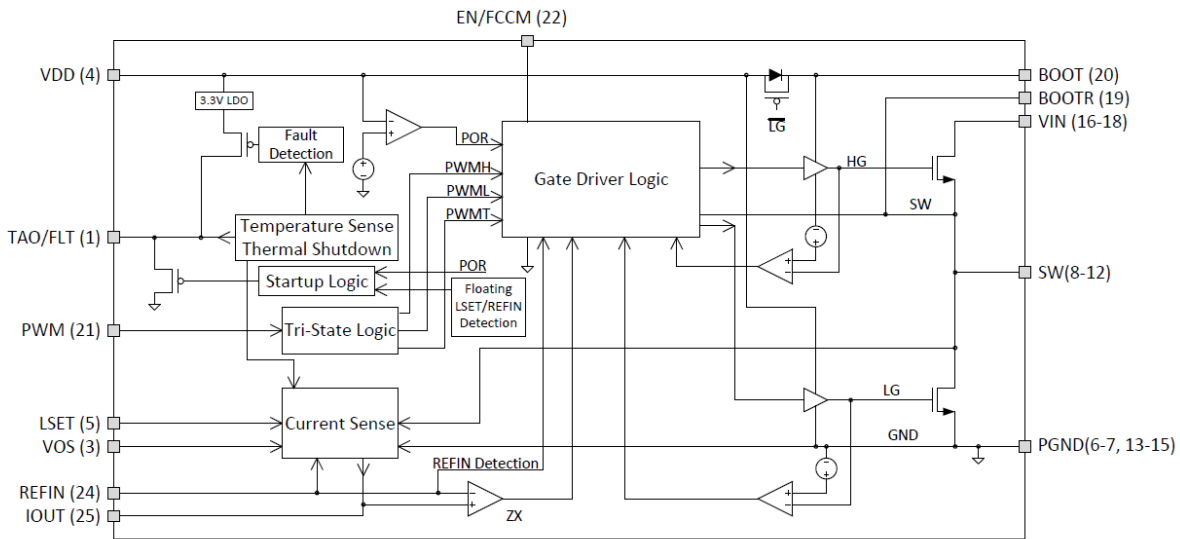


图 2 CSD95484 内部功能框图

上面只说明了同步 FET 导通时的电流检测方案，当同步 FET 关断，控制 FET 导通时，电感电流全部从控制 FET 中流过，便无法再通过检测同步 FET 漏极和源极两端的电压的方法获取电流信息。因此，CSD95484 采用了模拟电感电流检测方案，顾名思义，电感电流信息是“模拟”出来的，而非完全真实的电流。图 3 为 Current Sense 的详细框图，其电流检测的主要原理为：当 PWM 为低电平时，同步 FET Q2 开通，VSWS 和 PGND 通过 Kelvin 连接方式将 Q2 的导通压降传递给增益级（Trimmed Gain），此级主要对检测到的电压信号进行放大，并且可以校正 IC 工艺导致的器件偏差。第二级为温度补偿级（Temp Comp），温度变化会导致 $R_{ds(on)}$ 的变化，因此温度补偿可以校正温度变化对 $R_{ds(on)}$ 的影响。第三级为电感电流模拟级（Inductor Current Emulator），图 4 是 CSD95484 电感电流模拟级，IOUT 和 REFIN 是芯片的外部引脚，在两个引脚之间有一个电容，内部有两个可变电流源，分别是充电电流源和放电电流源，当 Q1 导通，Q2 关断时，充电电流源对电容进行充电，使电容电压线性上升；当 Q2 导通 Q1 关断时，放电电流源对电容进行放电，使电容电压线性下降，因此电容两端的电压是一个三角波，保证与电感电流的波形完全一致。FE OUT 是温度补偿级的输出反馈信号，VINS 和 VOUTS 是输出电压和输出电压的前馈信号，Control Logic 通过采集 VINS、VOUTS 和 FE OUT 的输入，结合温度、驱动电压、输出电感值和开关频率，从而控制两个可变电流源的电流值，以保证 IMON（即 IOUT 和 REFIN 之间电容的电压）与电感电流在任何工作条件下都能满足 $5mV/A$ 的比例关系。对于 Control Logic 来说，反馈信号 FE OUT 只有在每个周期同步 FET 导通时才起作用，前馈信号 VINS 和 VOUTS 是一直起作用的。

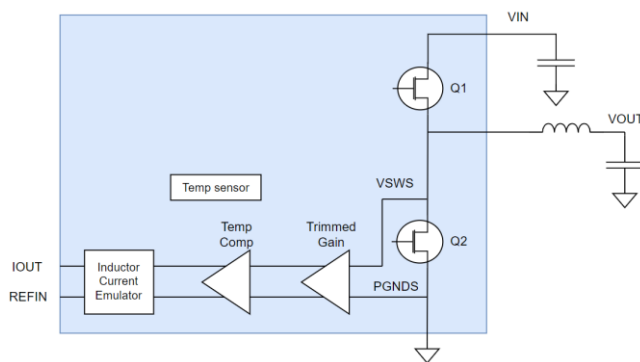


图 3 CSD95484 current sense 详细框图

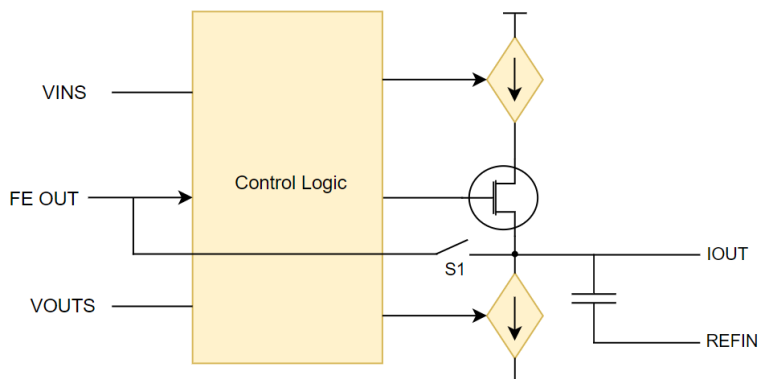


图 4 CSD95484 电感电流模拟级

因为 IMON 是模拟出来的，为保证在瞬态时电流检测也是精确的，CSD95484 每个周期都会进行 DC Reset。DC Reset 的原理为：同步 FET 关断时刻，DC Reset 会被触发，图 4 中 S1 开关闭合，FE OUT 直接接到 IOUT 上，IOUT 会被强行校正到真实值。图 5 为 DC Reset 的波形，黑色三角波为真实的电感电流波形，红色的三角波为模拟出来的 IMON 波形。由于电流模拟无法做到 100% 准确，因此两个波形会逐渐产生偏差，因此必须把此偏差校正。在 t_1 时刻，同步 FET 关断，进行一次 DC Reset，这样就可以把偏差校正为 0。DC Reset 对于此模拟电感电流检测方案至关重要，如果没有这个功能，IMON 在每个周期的都会积累一定的误差，参考图 6，随着周期数增加，误差会越来越大，IMON 逐渐“跑飞”，从而对环路控制及保护功能产生巨大影响。

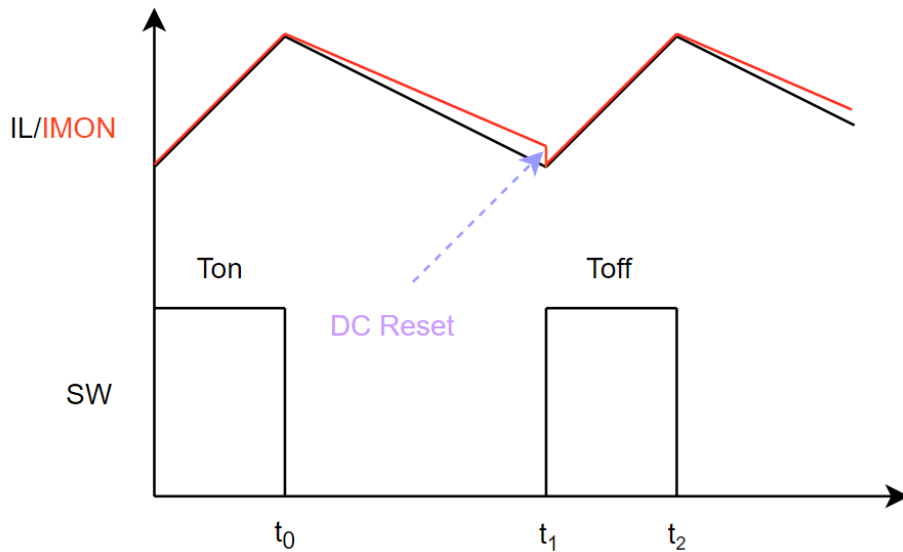


图 5 DC Reset 波形

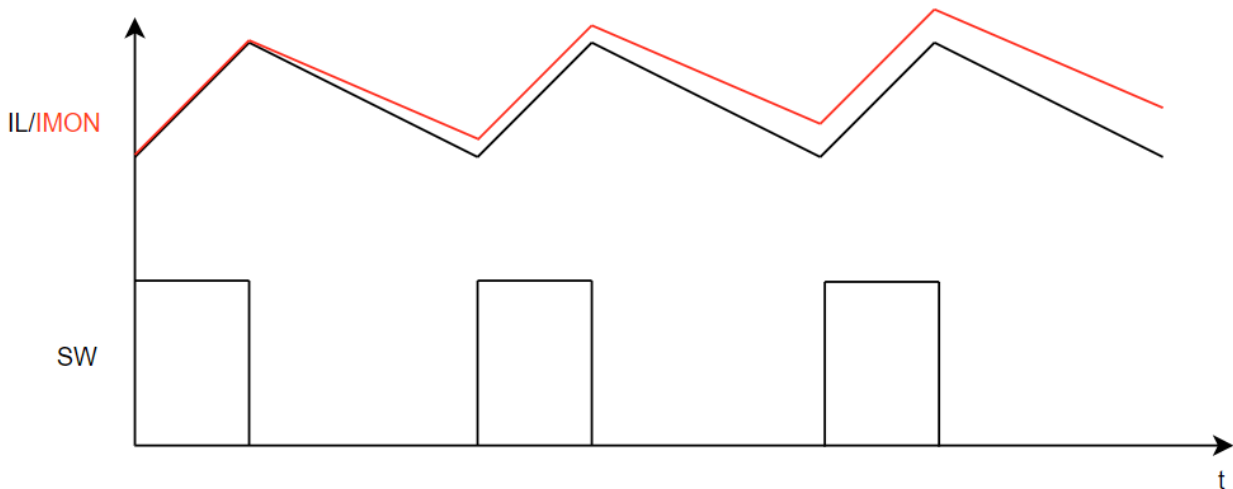


图 6 无 DC Reset 时的波形

除此之外，图 3 中的第一级增益级存在 Offset 误差，为保证电流检测的高精度，CSD95484 每 8 个周期会对增益级进行自动调零（Auto Zero），如图 7 所示，这时增益级会与 Q2 断开，并且彼此短接起来，这样增益级输入端的电压差为 0，由于 Offset 的存在，此时增益级的输出并不为 0，因此 CSD95484 会自动校正使其输出为 0，从而实现对 Offset 的校正。Auto Zero 发生时，Inductor Current Emulator 会与温度补偿级断开，以免 IMON 输出受到影响。Auto Zero 在同步 FET 导通时（即 Toff）发生，每 8 个周期发生一次，每次需要约 600ns 的时间才能完成。如果发生 Auto Zero 的周期其 Toff 小于 600ns，则 Auto Zero 无法完成，会在下一个周期的 Toff 继续进行 Auto Zero，如此顺延，直到完成为止。顺利完成 Auto Zero 的周期，会进行 DC Reset。但没有顺利完成 Auto Zero 的周期，不会进行 DC Reset，以免引发 IMON 异常。

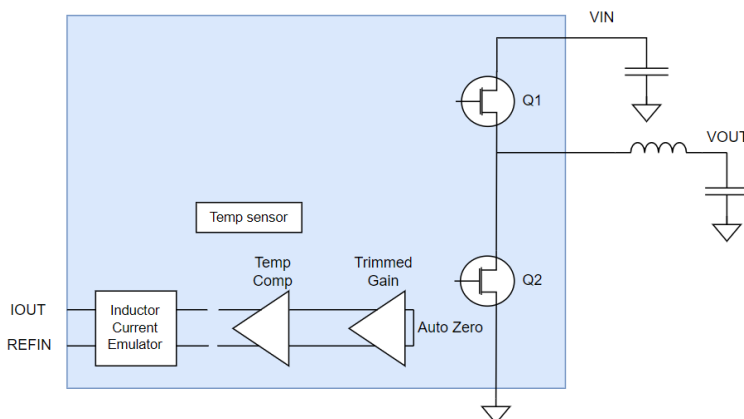


图 7 无 DC Reset 时的波形

注意：600ns 不是从 PWM 的下降沿开始计算的，而是从 SW 的下降沿开始计算的。

2 IMON 跑飞现象及说明

对于 CSD95484 而言，正常情况下，IMON 波形（IOUT-REFIN 的差分电压）应该为与电感电流波形成正比的三角波，但是在某些情况下，IMON 会出现“跑飞”现象，如图 8 所示。图 8 是基于 AMD 平台测得的，VR Controller 为 TPS53685，CSD95484 单 Phase 工作，开关频率为 1.2MHz，输出电压为 1.8V。CH1 为输出电压，CH2 为 IMON，CH3 为 PWM，CH4 为 SW。

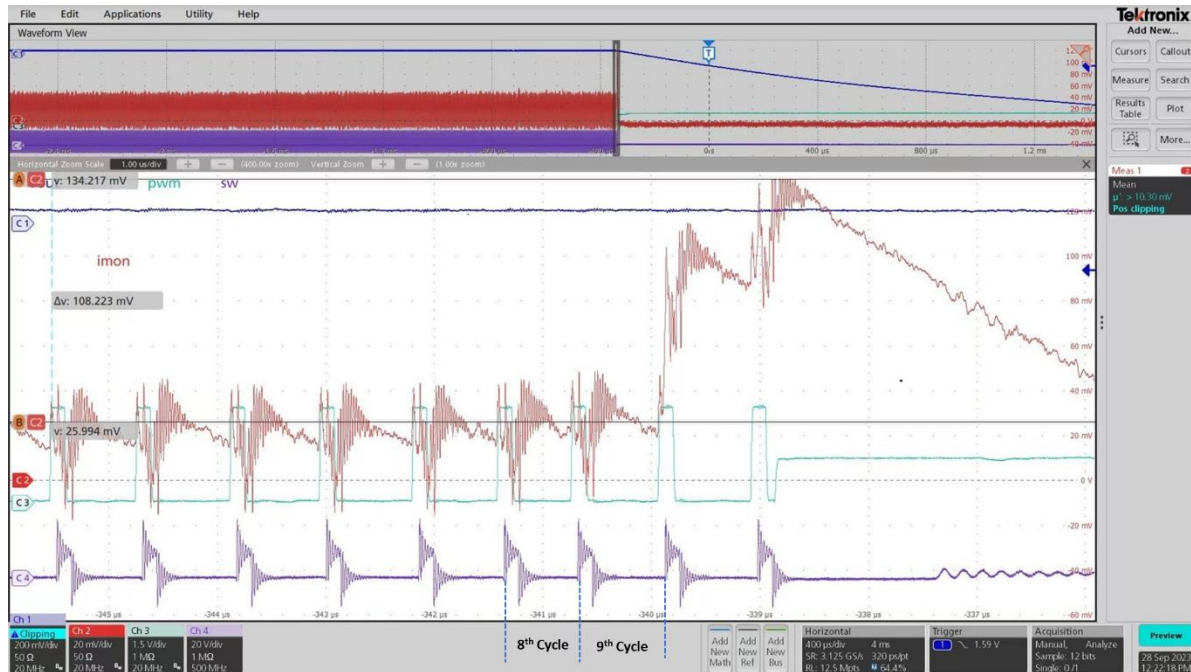


图 8 CSD95484 的 IMON “跑飞” 波形

从上图可以发现，在稳态工作时，IMON 波形突然“跑飞”，VR Controller 将 IMON 与内部设定的限流点比较，发现 IMON 超出限流阈值，触发 OCP。但是 PWM 和 SW 波形比较均匀，真实的电感电流不可能产生如此大的阶跃。因此可以判定此 IMON “跑飞” 是一个“假”的信号，并不能反映真实的电感电流。发生 IMON “跑飞” 现象的原因为：在上图第 8 个周期的 Toff 发生了 Auto Zero，但是此周期的 Toff 只有约 540ns，Auto Zero 无法完成，因此在第 9 个周期继续做 Auto Zero，此周期的 Toff 约为 660ns，Auto Zero 可以顺利完成，但是由于环路不稳定（环路稳定性由 VR Controller 的代码决定），Auto Zero 受到 Ground Noise 的影响在增益级产生了很大的 Offset，于是在第 9 个周期结束进行 DC Reset，此时前级的 Offset 会直接施加到 IMON 上，导致 IMON 的跳变，从而导致“跑飞”。并且，如果 Offset 较大，IMON “跑飞” 会分成多段进行，参考图 9，CH1 为 IMON，CH2 为输出电压，CH3 为 SW，CH4 为电感电流，原因在于 DC Reset 发生时，图 4 中的 S1 导通，FE OUT 与 IOOUT 并非直连，他们之间会存在一定的阻抗，类似于 FET OUT 对 IOOUT 进行 RC 充电过程，但是每次 DC Reset 的时间极短，如果 Offset 较大，很难在此时间内把 IOOUT 拉到与 FET OUT 相同的电压，因此在下一次 DC Reset 的时候，IOOUT 会继续跳变，直到 IOOUT 的电压与 FET OUT 相同。图 9 中的 t1 时段为第一次跳变，t2 时段为第二次跳变，且第一次跳变的幅度永远比第二次大，这也比较符合 RC 充电的特征。值得注意的是，后续的 DC Reset 无法把 Offset 校正回来，因为 DC Reset 发生在后级，Offset 存在于前级，这个 Offset 会在后续的 8 个周期内持续存在，直到进行下一次 Auto Zero，因此这 8 个周期的 IMON 都是失真的。

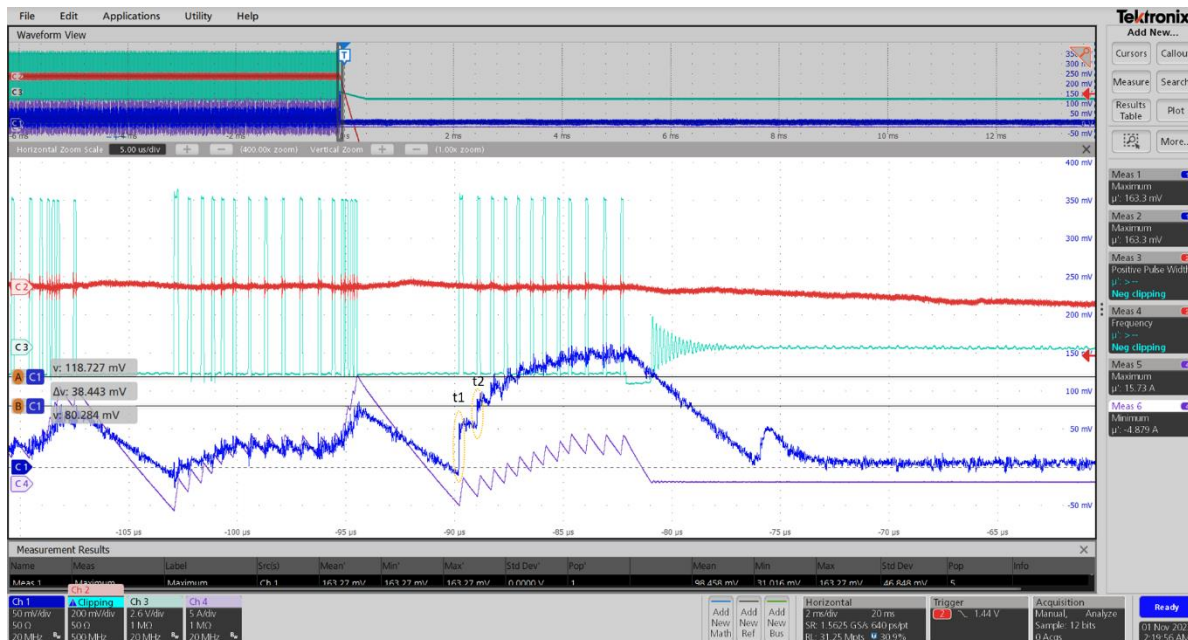


图 9 CSD95484 的 IMON 两段“跑飞”波形

但是某些情况下，IMON 波形看似“跑飞”但并未“跑飞”，如图 10 所示。CH1 为输出电流，CH2 为 SW，CH3 为输出电压，CH4 为 IMON。在图中有三段出现了 IMON 急速上升，这是因为瞬态过程中，为减小输出电压的 Overshoot 和 Undershoot，VR Controller 在重载时发出的 Pulse 会比较密集，轻载时发出的 Pulse 会比较稀疏，因此重载时的 IMON 波形上升非常迅速，但是并不属于“跑飞”现象，因为此时的 IMON 是可以反映真实电感电流的。

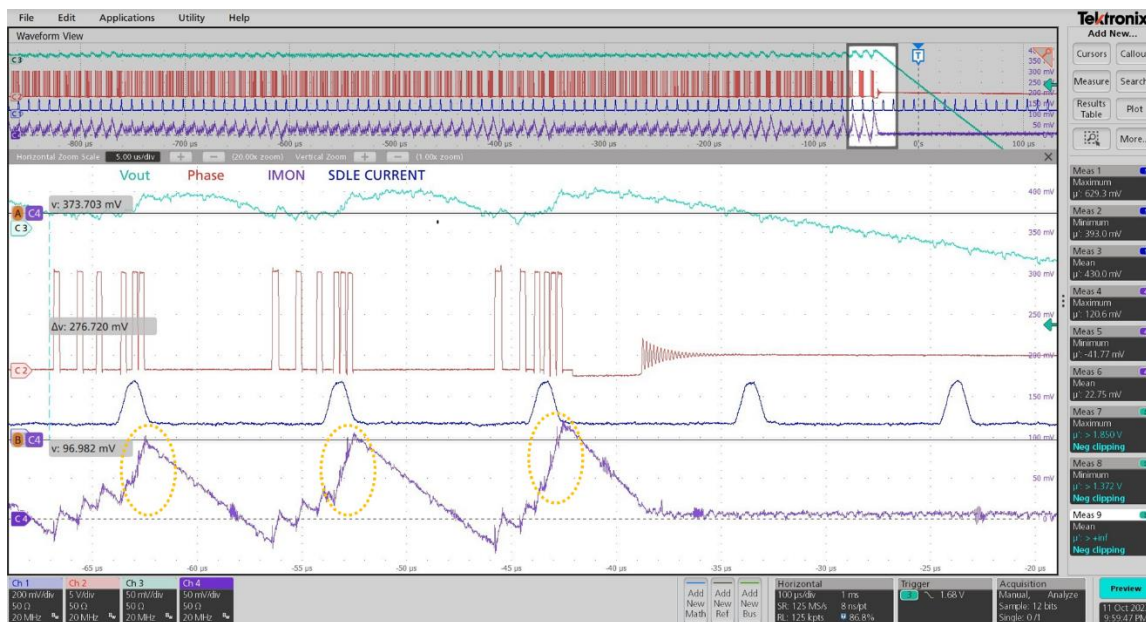


图 10 CSD95484 的 IMON 正常波形

当我们看到一个看似“跑飞”的 IMON 波形时，为规避风险，需要判断 IMON 波形是否是真的跑飞了，有几个方法：

- (1) 测量并观察 IMON 波形，如果 IMON 波形有跳变，并且跳变发生在 SW 的上升沿，随后 IMON 按一定斜率缓慢上升，则 IMON 发生“跑飞”。
- (2) 测量 IMON 波形和电感电流波形，看两者是否时刻满足 $5mV/A$ 的比例关系。此方法需要把电感翘起来才能测电感电流，实操比较麻烦。
- (3) 测量 IMON 波形和 SW 波形，如果在 IMON 迅速上升的过程中出现了 SW 连打 Pulse 的情况，则说明大概率不是 IMON “跑飞”。为进一步验证，可以利用如下公式计算，从而判断 IMON 的上升是否合理。

$$\Delta_{IMON} = \Delta_{IL} * 5mV/A = \frac{V_{in} - V_o}{L} \Delta t * 5mV/A$$

IMON “跑飞”是可以自动纠正的，因为“跑飞”的根本原因是 Auto Zero 引入了 Offset，然后 DC Reset 导致 IMON 阶跃。那么在下一次 Auto Zero 成功时，DC Reset 会把 IMON 会自动纠正回来，如下图 11 所示。CH1 为 IMON，CH2 为输出电压，CH3 为 SW，CH4 为电感电流。在第一个圆圈内，IMON 发生 2 段“跑飞”，若干周期之后的第二个圆圈内，Offset 减小，IMON 恢复性阶跃下降。若干周期之后的第三个圆圈内，Offset 彻底被校正，IMON 继续恢复性阶跃下降，在后续的时间内，IMON 仍可以真实反映电感电流。

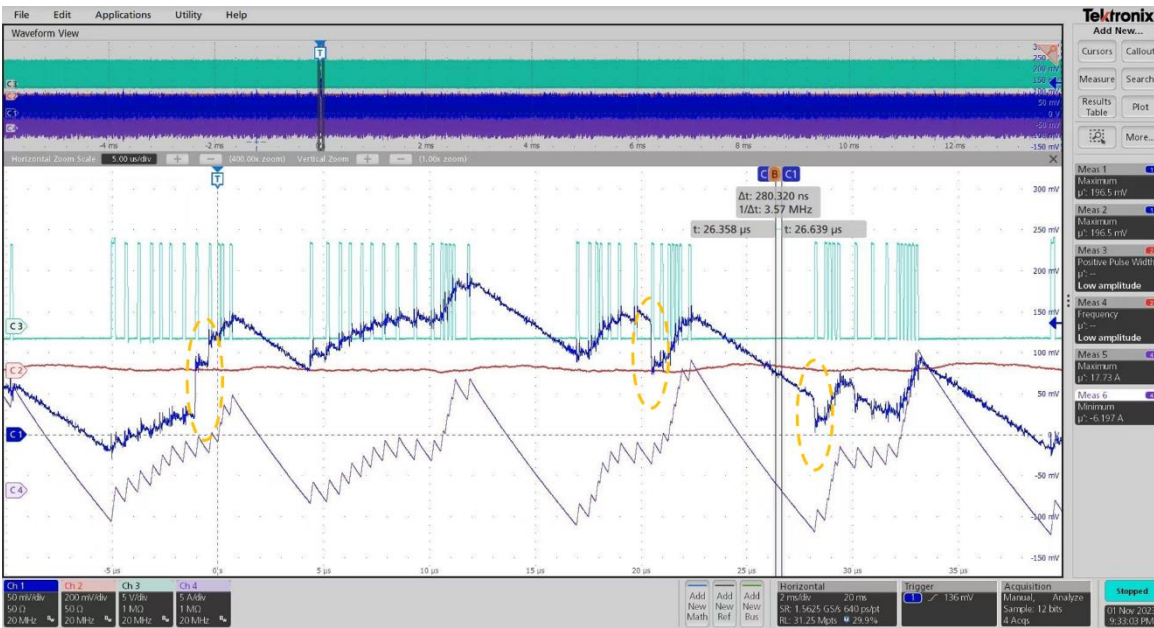


图 11 CSD95484 的 IMON “跑飞”及“恢复”波形

3 CSD95484 设计注意事项

IMON “跑飞”问题是我们必须要规避的，因为其不仅会影响控制环路，还有可能触发 OCP 的门限，使机器进入停机状态，造成严重影响。因此，在设计 VR 时应该注意：

- (1) 开关频率设置要合理。CSD95484 的最大开关频率为 1.25MHz，如果设置得过高会导致 Toff 时间太短，Auto Zero 无法完成，在下一个周期继续做 Auto Zero 的时候就很容易引入 Ground Noise，从而导

致 IMON 跑飞。如果输入电压 12V，输出电压 1.8V，开关频率选择 1.25MHz，那么稳态时的 Toff 为：

$$T_{off} = \left(1 - \frac{1.8V}{12V}\right) * \frac{1}{1.25MHz} = 680ns$$

看起来似乎是满足大于 600ns 的要求的，但是考虑到频率抖动（Jitter）和瞬态时的频率调整，总有某些周期是不满足大于 600ns 这个条件，因此建议留 20% 的裕量，把开关频率控制在 1MHz 以下。

- (2) 合理设计硬件反馈线路与 VR code，保证环路稳定，确保 Auto Zero 不受 Ground Noise 的影响。如何判定 VR 环路的稳定性在本文中不做详述。
- (3) 合理设计 Layout，确保 Power stage 的地平面足够大，并远离其他噪声干扰源。

4 小结

Power Stage 是 VR 电路的重要组成部分，本文主要研究电流检测（IMON），以 CSD95484 为例，首先介绍了 IMON 的基本原理，然后详细阐述了 IMON 跑飞现象及产生的原因，最后提供了规避方案，以求为其他 VR 设计者提供借鉴。

参考文献

- [1]. CSD95484 Datasheet. <https://ti.com/>
- [2]. 服务器 Power 电路设计. <https://cloud.tencent.com/developer/news/391988>

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司