

TI VR13.HC 多相电源输出过流保护理解与应用

Wenhao Wu/Feng Wu

摘要

随着ASIC和CPU工艺水平的提高，其核电压VCORE电流需求的提高也使得多相电源的应用越来越广泛。输出过流保护是多相电源的一个很重要的功能，也是设计时容易忽略的一部分。而多相电源又同时由控制器和功率级工作组成才能工作，这两者在不同过流情况时又有着不同的保护阈值和保护机制，给设计者的工作带来了困难。如果对过流保护理解不充分，有可能设计不当，给应用带来风险。本文给出了实际应用中出现的相关问题和解决思路，并由此拓展控制器和功率级配合时，过流保护的设计范例。

Contents

1. 简介	3
1.1 应用背景.....	3
1.2 问题分析.....	5
1.3 解决方案和思路.....	5
1.4 小结.....	7
2. 控制器 TPS53688 的过流保护机制	7
2.1 过流保护 OCF 和逐周期限流保护 OCL.....	7
2.2 过流告警 OCW.....	9
2.3 不均流告警 ISHARE.....	9
2.4 总结.....	9
3. 功率级 CSD95410 过流保护	11
3.1 过流保护 OCP(Over current protection)	11
3.2 负向过电流检测(NOCD).....	12
3.3 上管短路检测(HSS).....	13
3.4 总结.....	13
4. 多相电源系统性 OCP 保护的理解与应用	14
4.1 OCL, OCP 和 OCW 设计	14
4.2 多相电源负向电流过流保护 (NOCP)及其机制	15
5. 结论	16
参考文献	16

Figures

Figure 1. 短路时上管应力.....	3
Figure 2. 合并电感波形测试上管应力	4
Figure 3. CSD95410 环路寄生参数示意图.....	4
Figure 4. OCF 简化框图	5

Figure 5.	OCL 波形图	6
Figure 6.	OCL 波形图	6
Figure 7.	OCL 故障记录.....	6
Figure 8.	TPS53688+CSD95410 电流反馈连接示意图	7
Figure 9.	OCF 实测波形.....	8
Figure 10.	OCF 故障记录.....	8
Figure 11.	负载靠近 OCL 时波形	9
Figure 12.	ISHARE 原理框图.....	9
Figure 13.	OCF 阈值.....	10
Figure 14.	OCF 精度.....	10
Figure 15.	OCF 响应设置.....	10
Figure 16.	故障寄存器记录	10
Figure 17.	TPS53688+CSD95410 TAO/FLT 连接示意图.....	11
Figure 18.	OCL 阈值.....	11
Figure 19.	OCL 波形示意图	12
Figure 20.	灾难性过流阈值	12
Figure 21.	灾难性过流保护波形示意图.....	12
Figure 22.	NOC 阈值	13
Figure 23.	HSS 阈值.....	13
Figure 24.	锁死复位时序要求.....	13
Figure 25.	过流保护阈值设计总结.....	15
Figure 26.	控制器端 TAO/FLT 告警阈值	15
Figure 27.	PSFLT_RESP 响应设置	15
Figure 28.	负向过流保护实测波形.....	16

1. 简介

输出过流保护 (Output Over-current Protection, OCP) 是一个电源中常用的功能，用于保护电源本身以及后端的负载，避免极端工作情况下，过大的热应力和电应力降低系统可靠性甚至损坏器件。多相电源通常由一颗多相控制器 (Controller) 和数颗功率级 (Power stage) 组成，以提供更强的输出电流能力，满足 CPU 的供电需求。但正是因为多相电源大电流的特点，精准的过流保护设计比普通的电源芯片更加重要。

在服务器 VR13.HC 方案中，使用控制器 TPS53688 和功率级 CSD95410 方案进行短路测试时，发现即使将控制器端的 OCP 阈值设在了较低的值，输出短路测试时功率级上管也还是有很大的瞬态电压应力，超过了功率级的极限耐压值。这种过大的瞬态电压应力会对功率级的长期运行可靠性产生极大的风险和隐患。但是，把 OCP 阈值设置得过小，虽然可能可以保护住功率级，但是在负载动态时却有可能因为 OCP 过小进行误保护，导致电源输出无法满足负载的正常工作要求。

本文首先将分析短路时导致功率级过应力的原因，并由此深入讨论多相控制器 TPS53688 的过流保护机制。随后，以服务器常用的 CSD95410 为例，拓展讨论功率级的过流保护机制。简述在面对输出不同的过流情况时，功率级不同于多相控制器的多种保护模式，并且其响应时间和保护阈值也有所不同。最后阐述当多相控制器和功率级合并设计输出过流保护时的步骤和需要注意的问题。

1.1 应用背景

在服务器 VR13.HC 方案中，使用多相控制器 TPS53688 的通道 B 配合单相功率级 CSD95410 拟为 CPU 的 VCCSA 供电。设置多相控制器的 OCP 阈值为 31A，进行输出短路测试。输出接空气开关，测试功率级在开关进行短路动作时上管的最大瞬态应力 V_{DS} ，发现测得的结果超过了数据手册中标定的 23V/10ns，不满足功率级的可靠性要求。使用 EVM 复测，测试时降低 OCP 阈值到 25A，发现上管的最大瞬态应力 V_{DS} 仍有有相同问题。如 Figure 1 所示，空开短路时，上管最大 V_{DS} 应力超过了 23V。

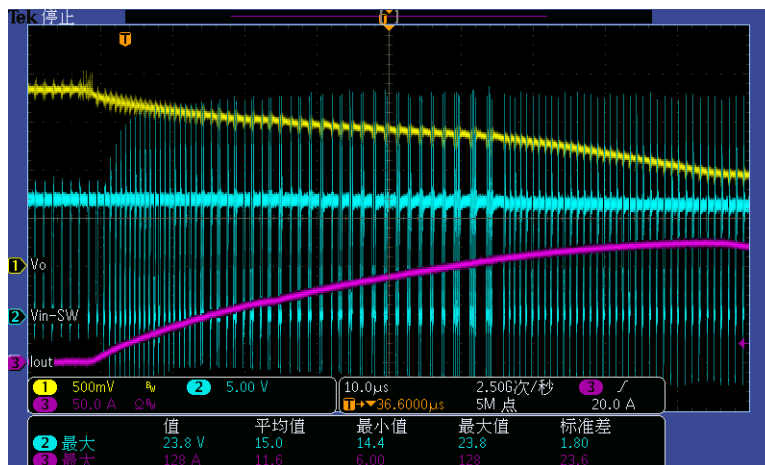


Figure 1. 短路时上管应力

为了找到过应力的原因，将电感电流合并进行了测试，如 Figure 2 所示，电感电流在短路时最大可达 118A，远远超过了 25A 的阈值。

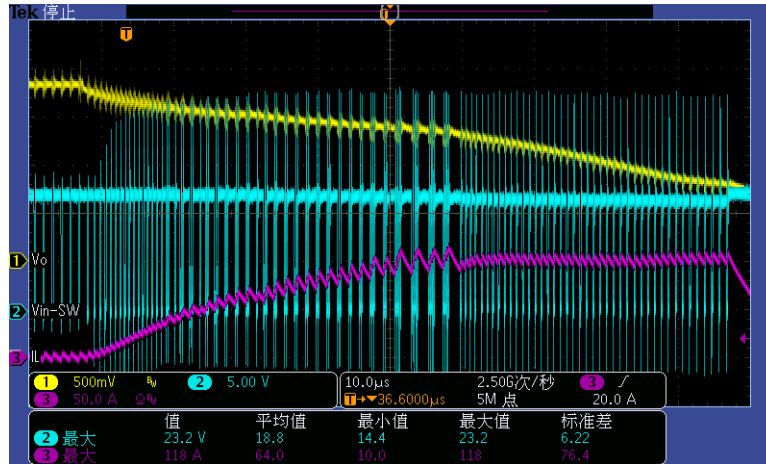


Figure 2. 合并电感波形测试上管应力

CSD95410 的 SW 节点的最大瞬态应力来自于环路中的寄生电感，分析 buck 电路的拓扑结构和寄生参数，可简化其寄生电感分布如 Figure3 所示。当 SW 节点达到最大瞬态应力时，上管导通，下管关断。此时上管电流 $I_{HS} = I_L + I_{LS_Coss}$ (电感电流+下管 Coss 充电电流)，环路的寄生电感 ESL_1~6 与下管的 Coss，以及环路的寄生电阻发生 LCR 谐振，在 SW 产生了电压尖峰。LCR 谐振的初始能量来自寄生电感，当上管导通，下管关断时，ESL_1~3 上流过 I_{HS} ，ESL_4~6 上电流为 0，因此 LCR 谐振的初始能量为 $1/2 * (ESL_1 \sim 3) * I_{HS}^2$ 。输出电流越大，对应的电感电流越大，寄生电感 ESL_1~3 储存的初始能量越高，则谐振的幅值越大，SW 的最大瞬态应力越高。由此可见，多相控制器在短路时并没能及时按照阈值进行保护，从而导致电感电流跑飞是 SW 瞬态应力超规格范围的根本原因。

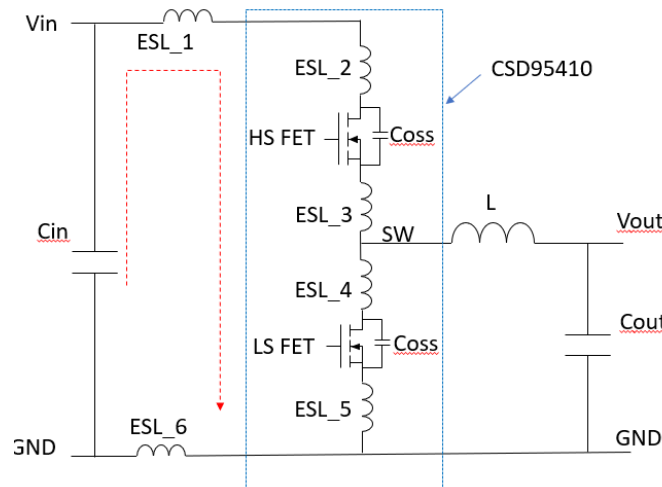


Figure 3. CSD95410 环路寄生参数示意图

1.2 问题分析

要清楚为什么 OCP 保护在短路时无效，首先先分析 TPS53688 控制器 OCP 的机理，OCP 是一个比较宽泛的定义，从手册可知，OCP 其实就是 TPS53688 的过流保护 Overcurrent fault (OCF)。

OCF 是电源设计中最常用最关注的点。当一个通道的总采样电流超过预设的过流点 IOUT_OC_FAULT_LIMIT (46h) 时，控制器将会按照 IOUT_OC_FAULT_RESPONSE (47h) 中预设的模式进行保护。设置 OCF 过流保护点时，PHASE (04h) 需要设置为 FFh。

如 Figure 3 是 OCF 的简化原理框图，TPS53688 将功率级采样的电流信号相加，通过 40us 的模拟滤波滤除噪声，ADC 将信号再转化成数字信号，经过 16us 的数字滤波，再在补偿之后得到 IMON 信号送入数字比较器进行过流判断。

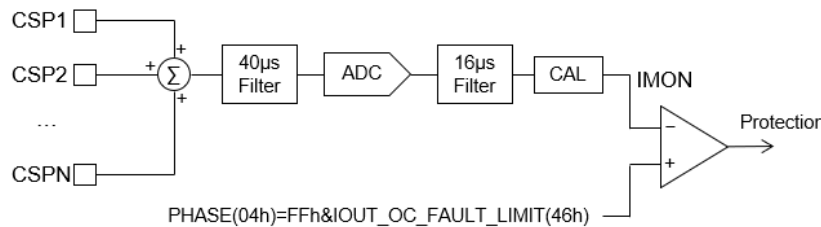


Figure 4. OCF 简化框图

由 OCF 的原理框图可知，OCF 实质上是利用了经过滤波和补偿的电流采样信号 IMON，进行的过流保护判断。由于 IMON 和实际的电流信号必然会有延迟。这个延迟从输出电流超过设置的 IOUT_OC_FAULT_LIMIT 开始，到 PWM 进入三态为止，最大不会超过 $t_{RESP(OCF)}=200\mu s$ 。所以，当输出短路时，由于输出电流变化率太大，导致电感电流在 OCF 延迟响应的时间内远远超过了 OCF 阈值。功率级在如此大的电流下工作，最后导致了 V_{DS} 应力过大。

1.3 解决方案和思路

由于 OCF 在保护时依赖 IMON 进行保护动作的判断，有比较大的延迟，所以不适合用在短路保护或者负载变化比较快的场景中。控制器需要一个低延迟的保护机制才能有效地在输出短路时及时进行动作。这个保护不能依赖于 IMON，需要取功率级的 CSP 的实时电流采样信号和保护阈值直接进行比较。由数据手册可知，TPS53688 输出电流相关的保护和警告分别有四种，分别为过流保护 Overcurrent fault (OCF)，逐周期限流保护 Per-phase overcurrent limit (OCL)，过流告警 Overcurrent warning (OCW) 和不均流告警 Current share warning (ISHARE)。其中 OCF，OCW 和 ISHARE 均是由 IMON 进行判断，只有 OCL 是取功率级的 CSP 进行的保护，滤波延时极短。

OCL，针对每相功率级进行逐周期限流保护。Figure 5 是 OCL 的简化波形图，以两相工作为例。由图可知，当每相电流在谷值时，通常是下管关断，上管导通之前，控制器会将该谷值和预设的限流点 IOUT_OC_FAULT_LIMIT (46h) 相比较，当发现谷值超过限流点 IOUT_OC_FAULT_LIMIT (46h) 之后，上管将不会导通，直到该相采样电流回到限流点处，上管才继续导通。设置限流点时，PHASE (04h) 需要设置为 00h。当输出端过流严重时，抽取的电流大于电源能提供的电流总和，负载会持续从输出电容上抽取剩余电荷，导致输出电压降低直至触发输出欠压保护 (UVF)。

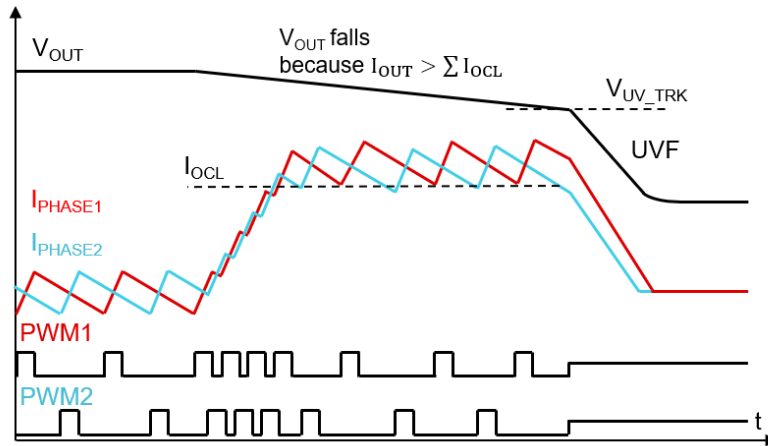


Figure 5. OCL 波形图

由 OCL 的原理可知，OCL 是即时保护，仅经过很短的滤波，是不经过 ADC 采样而直接通过模拟方式进行的保护。那么，输出短路时，OCL 可以及时的保护住功率级，并有效限制电感电流谷值。将控制器的 OCL 设置为 44A，并维持原来的 OCF 为 25A 不变，进行短路测试。测试波形如图 Figure 6，当电感电流超过了 OCF 时，控制器没有进行保护，而是控制功率级继续提升电感电流，直到电感电流超过 OCL 时，电感电流谷值被立即限制到 44A。由于负载电流大于电感提供的电流，输出电压快速下降并触发 UVF。读取控制器的状态寄存器可知，如图 Figure 7 所示，OCF 并没有触发，在这个瞬态过程中，触发的保护是 UVF。

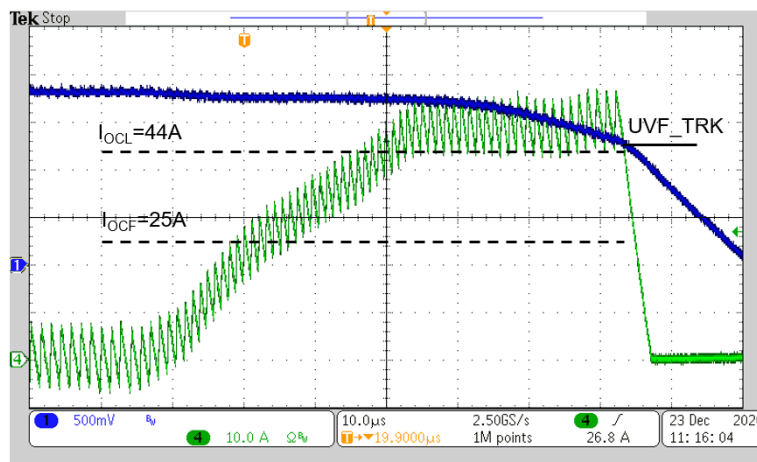


Figure 6. OCL 波形图



Figure 7. OCL 故障记录

1.4 小结

输出短路时，电感电流快速上升，传统 OCP，也就是控制器的 OCF 的保护存在较大的延时，所以不适合用来进行短路保护。而 OCL 直接利用了功率级的电流采样信号，仅经过极短的滤波，逐周期的进行每相的电流限流。改用 OCL 进行电流限制，可以有效的在短路时保护功率级，保证负载瞬态时不会出现过大的电流应力，提高了系统和器件瞬态中的可靠性。

2. 控制器 TPS53688 的过流保护机制

应用好控制器的过流保护机制可以有效的在负载瞬态时保护系统和器件，并提升整体可靠性。错误过流设置可能会导致上述类似的应用问题，从而对电源和负载产生不必要的风险和隐患。所以，有必要进一步理解控制器端的输出电流保护原理，理解这些保护背后的意义。如上所述，控制器 TPS53688 输出电流相关的保护和警告分别有四种，过流保护 OCF 和逐周期限流保护 OCL，过流告警 OCW 和不均流告警 ISHARE。控制器 TPS53688 所需的电流信号均由功率级 CSD95410 采样得到，通过 Iout pin 反馈到 TPS53688 的 CSP pin，最后在控制器内部分别处理后得到各个用于不同过流保护的电流值，其示意图如 Figure 8 所示。

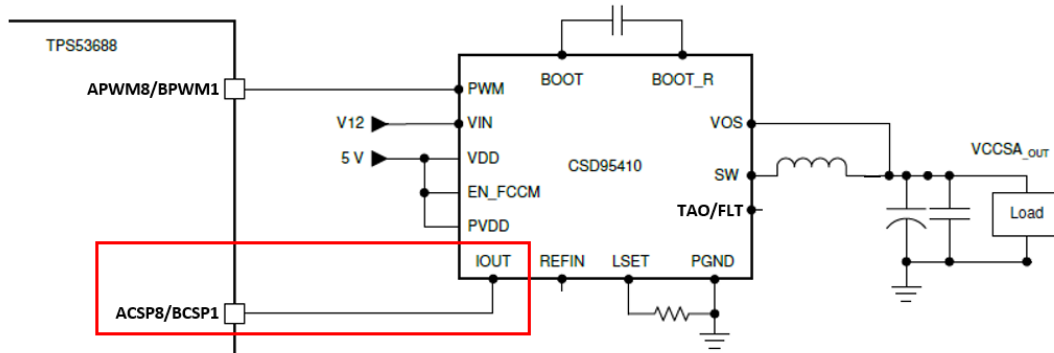


Figure 8. TPS53688+CSD95410 电流反馈连接示意图

2.1 过流保护 OCF 和逐周期限流保护 OCL

这两个保护的机制前文已经分析，这里不再赘述。下面简述这两个保护的意义的深入理解。

OCF 是侧重于负载总电流的保护，保护的是系统整体的功耗和发热情况。由于存在延时，只有当负载缓慢过流时，才能较好地响应。Figure 9 是触发了 OCF 的实测波形，测试条件为 TPS53688+1xCSD95410, Vin=12V, Vo=1.8V, DCLL=0mOhm, OCF=25A, OCL=44A, UVF 阈值为 VID-416mV。电子负载设置为 0A 到 50A，斜率为 20mA/us 进行拉载。由波形可见，当输出电流超过了 OCF 阈值时，经过大概 100us 的延时，控制器关断上下管进行了保护动作。读取状态寄存器，可知触发的是 OCF 保护，如 Figure 10 所示。

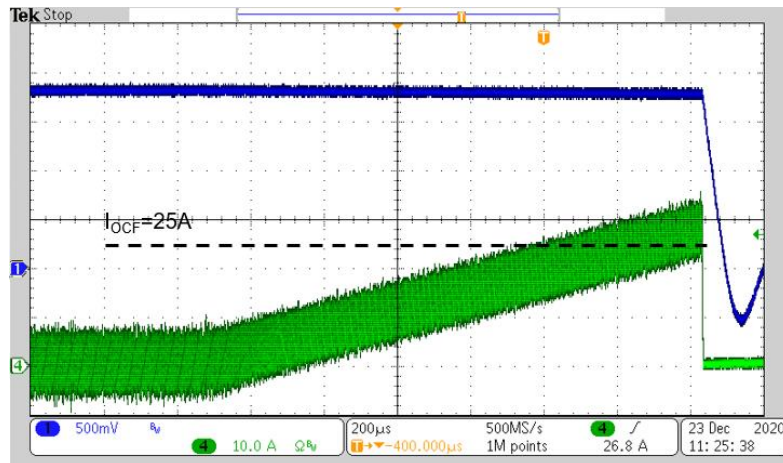


Figure 9. OCF 实测波形

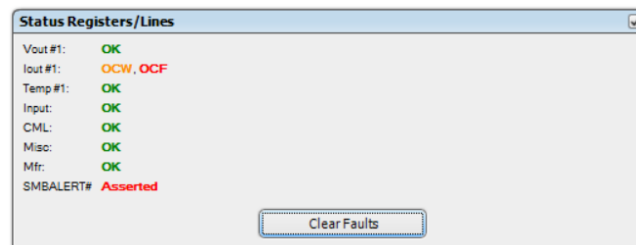


Figure 10. OCF 故障记录

与 OCF 不同的是，OCL 的保护速度更快，其作用是限制各相的最大电流，防止在输出过流和短路时功率级瞬间过电流导致的电感饱和及功率级电压应力超标问题。但是 OCL 更侧重于保护单相的器件，而对于总电流不敏感，所以不能纯粹依靠 OCL 进行负载过流保护。另外，OCL 是单相谷值保护，这种保护只能有效的保证电感电流谷值不超过阈值，事实上电感电流峰值会大于 OCL 一个 TON 电流纹波，实际设计时需要考虑这一点，并且在设置 OCL 阈值时留有余量。

Figure 11 是实测的 OCL 波形，测试条件为 TPS53688+1xCSD95410， $V_{in}=12V$ ， $V_o=1.8V$ ， $D_{CLL}=0m\Omega$ ， $O_{CF}=55A$ ， $O_{CL}=35A$ 。实验使用电子负载进行 20A 到 45A 负载跳变，UVF 阈值为 VID-416mV。可见，电感电流的谷值基本在 35A 附近，测得电感电流纹波 ΔI 为 13.6A，对应的单相最大输出平均电流为 $O_{CL} + \frac{\Delta I}{2} = 41.8A$ 。

从 OCL 的保护机制和波形结果也可以看出，OCL 的保护精度取决于功率级端电流采样信号，如果瞬态时电流采样信号含有噪声，或者离真实电流信号有较大延迟，则 OCL 不一定能进行起到良好的保护作用，恶劣情况时保护甚至有可能会失效，导致应用风险。TI 的 smart power stage 采用仿真电流模式 (emulate current mode) 获得功率级的电流信号 CSP，在负载瞬态和稳态时均能和真实电流信号保持一致。

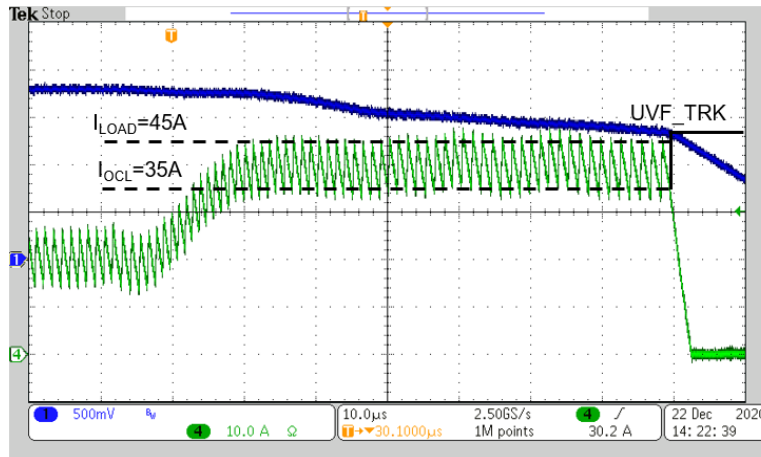


Figure 11. 负载靠近 OCL 时波形

2.2 过流告警 OCW

OCW，过流告警。当一个通道的总采样电流超过预设的告警点 $IOUT_OC_WARN_LIMIT$ (4Ah) 时，控制器识别到输出电流触发过流告警，并置位状态寄存器中的相应状态位。OCW 时不会触发保护，只会置位寄存器。

OCW 的电路结构和 OCF 类似，但 OCW 的作用向提供上位机一个电流警告信号。OCW 的设置有助于系统实现信号完整性设计和负载功率管理功能。

2.3 不均流告警 ISHARE

ISHARE，不均流告警。ISHARE 的基本原理图如 Figure 12，当单相平均电流和输出总采样电流的平均值之差大于均流门限时，均流告警触发，并置位状态寄存器中的相应状态位。告警时不会触发保护，只会置位寄存器。

由图可知，ISHARE 的速度会比以上所有相关保护和告警都要慢，不均流告警的意义和 OCW 一样，都可以帮助提高系统完整性。但是区别在于 ISHARE 可以精确到每相的工作情况，帮助上位机更精准更快的定位故障。

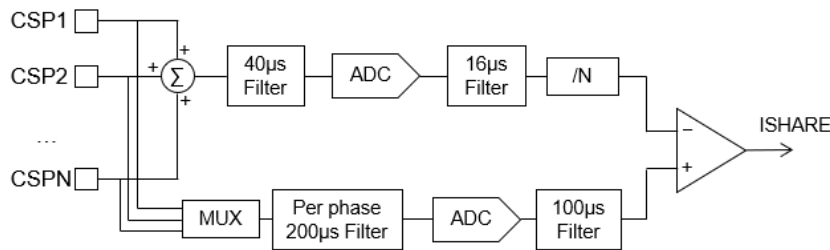


Figure 12. ISHARE 原理框图

2.4 总结

在利用上述的电流保护和警告进行系统的保护设计时，应注意以下几点：

- 各个保护和警告电流阈值可以通过芯片的寄存器进行设置，但是有固定范围，设置阈值的步进也会有限制。例如 Figure 13 设置通道 A 的 OCF 时，保护点 IOUT_OC_FAULT_LIMIT 的设置范围为 1A-1023A，步进为 1A；

Programmable Range ⁽²⁾	1	1023	A
Resolution	1		A

Figure 13. OCF 阈值

- OCF, OCW 和 ISHARE 会受到精度和 IMON 补偿影响。如 Figure 14, TPS53688 通道 A 的 OCF 阈值 $\leq 45A$ 时，精度为 $\pm 5.25A$ ，当 OCF 阈值 $> 45A$ 时，精度为 $\pm 5\%$ 。因为 OCF, OCW 和 ISHARE 实质上是通过 IMON 进行过流判断，所以 IMON 电流的良好补偿可以提高保护精度；

Accuracy (8 phase, $I_{OCF} \leq 45 A$)	-5.25	5.25	A
Accuracy (8 phase, $I_{OCF} > 45 A$)	-5	5	%

Figure 14. OCF 精度

- OCF 的保护机制可以通过寄存器设置。通过设置 IOUT_OC_FAULT_RESPONSE (47h) 可以选择 OCF 时控制器的保护机制。一般有 Figure 15 中的三种方式可以选择，分别为忽略 (Ignore)，锁死 (Latch-off) 和打嗝 (Hiccup)。具体选用哪种机制取决于用户的要求，但是需要注意不是所有的控制器的保护机制都可以自由选择，有的控制器可选的机制只有一种或者两种。

Bit	Field	Access	Reset	Description
7:3	IO OC RESP	RW	NVM	Output over-current response. 00000b: Ignore. Continue operating without interruption. 11000b: Latch-off immediately. Shutdown and do not restart. Restart/clearing behavior is specified in the PMBus Specification v1.3, part II, section 10.7. 11111b: Hiccup immediately, shutdown and attempt to restart after 1 HICCUP time and repeat, until either the unit is commanded OFF, or a successful start-up retrieval. Other: Invalid/Unsupported

Figure 15. OCF 响应设置

- 发生保护和警告时，芯片会置位状态寄存器。对于 TPS53688，可以通过状态寄存器 STATUS_IOUT 去具体判断故障属于哪一种，如 Figure 16 所示。

Bit	Field	Access	Reset	Description
7	IOUT OCF	RW	0b	0b: Latched flag indicating IOUT OC fault has NOT occurred 1b: Latched flag indicating IOUT OC fault has occurred
6	Not Supported	R	0b	Not supported and always set to 0b
5	IOUT OCW	RW	0b	0b: Latched flag indicating IOUT OC warn has NOT occurred 1b: Latched flag indicating IOUT OC warn has occurred
4	IOUT UCF	RW	0b	0b: Latched flag indicating IOUT UC fault has NOT occurred 1b: Latched flag indicating IOUT UC fault has occurred
3	CUR SHAREF	RW	0b	0b: Latched flag indicating current share fault has NOT occurred 1b: Latched flag indicating current share fault has occurred
2:0	Not Supported	RW	0b	Not supported and always set to 000b

Figure 16. 故障寄存器记录

3. 功率级 CSD95410 过流保护

多相电源由控制器和功率级组成，用户在设计多相电源时也不一定会使用同品牌的配套方案。在输出过流时，控制器和功率级可能会有不同的响应方式和保护阈值。设置控制器的保护时也不能不考虑功率级的情况。所以，有必要对功率级的过流保护阈值和保护机制进行拓展。以 CSD95410 为例，参考手册可知，其电流相关的保护一共三种，分别为 Over current protection (OCP)，Negative over current detection (NOCD) 和 High-side short detection (HSSD)。电路发生过流保护时，TAO/FLT 会被拉高到 3.3V，同时将该信号反馈到控制器的 TBSSEN 引脚，如 Figure 17 所示。下面分别讲解各个保护的机制。

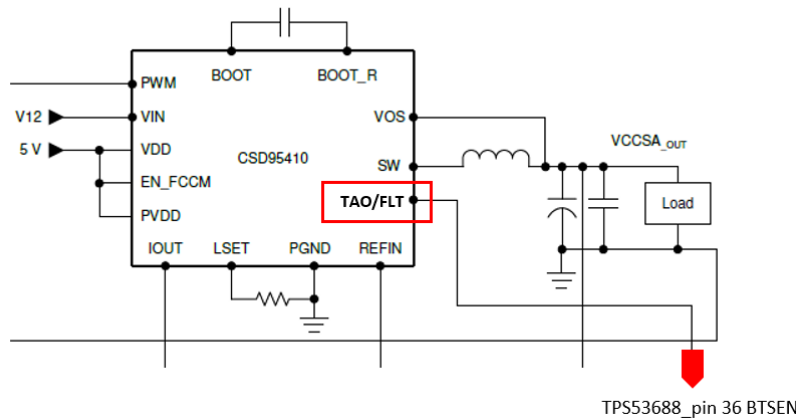


Figure 17. TPS53688+CSD95410 TAO/FLT 连接示意图

3.1 过流保护 OCP(Over current protection)

CSD95410 的 OCP 在两种情况下的保护机制不同，第一个是限流过流保护，当上管 (Control FET) 的电流超过 $I_{oc,L}$ 时，如 Figure 18 所示，功率级会提前关断上管，导通下管 (Sync FET)，在下一个 PWM 周期重新打开上管。如果上管连续 10 个 PWM 周期内超过 $I_{oc,L}$ ，功率级会在 80ns 内立即将上下管的驱动拉低，SW 处于高阻态，同时 TAO/FLT 被拉高到 3.3V，以告故障，通知前端控制器控制 PWM 进行响应。

$I_{oc,L}$	Over Current Threshold, Non-Catastrophic	EN = 5 V, PWM = 5 V	95	100	A
------------	--	---------------------	----	-----	---

Figure 18. OCL 阈值

下面这个波形示意图 Figure 19 中，通道 1 是电感电流信号，通道 2 是控制器的 PWM，通道 3 是 SW，通道 4 是 TAO/FLT。可以看到当输出端因为短路，电流快速达到 $I_{oc,L}$ 时，不论 PWM 是否为高，功率级都会提前将上管关断。当该动作发生 10 次后，上下管驱动立即拉低，TAO/FLT 拉高。从图中可以看出，当输出快速过流时，功率级的保护速度要快于 PWM 的响应，起到了快速保护的作用。

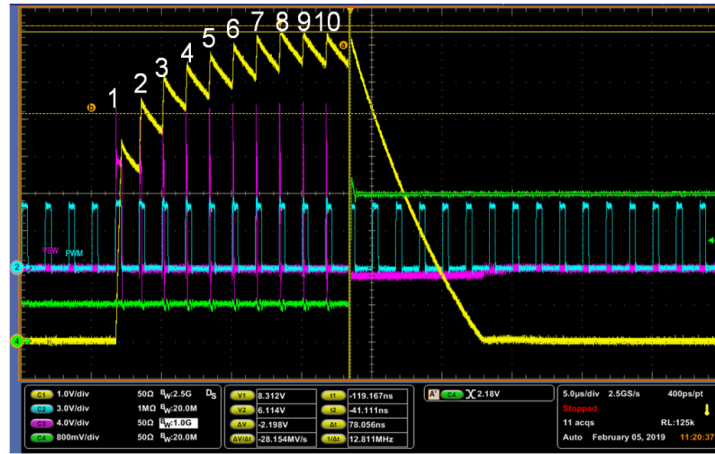


Figure 19. OCL 波形示意图

第二种情况是，如果上管电流上升过快，例如 SW 偶然短接到地，每个 PWM 周期内提前关断上管已经来不及限制电流，则上管电流必然每个周期都会快速升高，当上管电流超过 $I_{OC,H}$ 时，这种过流被认为是灾难性过流 (Catastrophic over current)。此时，快速短路保护会被触发，功率级会立即将上下管的驱动拉低，SW 处于高阻态，同时 TAO/FLT 拉高到 3.3V 告故障。第二种过流的阈值如 Figure 20，该阈值远大于第一种情况。

$I_{OC,H}$	Over Current Threshold, Catastrophic	EN = 5 V, PWM = 5 V	115	120	A
------------	--------------------------------------	---------------------	-----	-----	---

Figure 20. 灾难性过流阈值

在波形示意图 Figure 21 中，通道 1 是控制器的 PWM，通道 2 是 SW，通道 3 是 TAO/FLT，通道 4 是 IL 信号，可以看到功率级在 10 次上管关断之前就锁死且 TAO/FLT 拉高告故障。

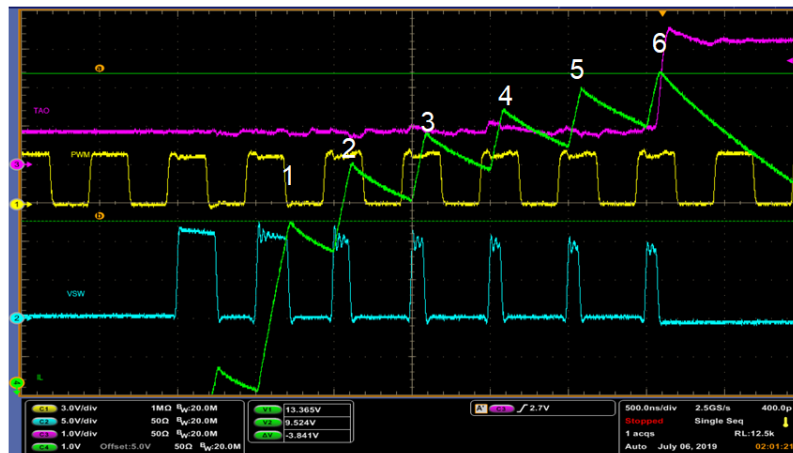


Figure 21. 灾难性过流保护波形示意图

3.2 负向过电流检测(NOCD)

负向过电流检测 (Negative over current detection)。功率级发现下管 (sync FET) 的负向电流 (从漏极到源级) I_{DS} 超过阈值 I_{NOC} 后，会立即拉高 TAO/FLT 管脚电压到 3.3V，以此来向控制器告故

障。但是，是否进行保护和进行何种保护取决于控制器的设置。对于 CSD95410，触发 NOCD 的条件是 I_{DS} 超过 I_{NOC} ，如 Figure 22 所示。

I_{NOC}	Negative Over Current Threshold	EN = 5 V, PWM = 0 V	35	50	A
-----------	---------------------------------	---------------------	----	----	---

Figure 22. NOC 阈值

3.3 上管短路检测(HSS)

上管短路检测 (High-side short detection)，是功率级的 PWM 拉低时，如果监测到下管的负向电流（从漏极到源级） I_{DS} 快速超过阈值 I_{HSS} ，如 Figure 23 所示，上管短路被触发，TAO/FLT 被立即拉高到 3.3V。但是，功率级会继续响应 PWM，不会进行保护，是否进行保护和进行何种保护同样取决于控制器的设置。

I_{HSS}	High Side Short Threshold	EN = 5 V, PWM = 0 V	83	95	A
-----------	---------------------------	---------------------	----	----	---

Figure 23. HSS 阈值

3.4 总结

在应用功率级的过流保护时，不论其是否和控制器来自一家供应商，都应注意以下几点：

1. 保护后锁死复位方式。对于 CSD95410，触发内置 OCP 时功率级的上下管均会关断锁死，TAO/FLT 会被拉到 3.3V。有两种方法可以进行复位。第一种是控制器将 PWM 置入三态区 (tri-state window) 并维持 t_{3HT} ，对于 CSD95410，此窗口电压为 1.2V 到 2.2V，TPS53688 可以通过 PMBus 发送 CLEAR_FAULTS 或者 EN toggling 的方式将 PWM 置入三态。具体来说，EN toggling 硬件上可以用 CNTL 或者软件上 ON_OFF_CONFIG 和 OPERATION 命令实现。第二种方法是将 VDD 上下电，将该电压拉到 3.7V 以下使功率级欠压，随后抬升 VDD 到 4.2V 以上将内部逻辑电路重置；相关的阈值如 Figure 24 所示。

V_{PWMH}	PWM Logic Level High		2.2	2.5	2.7	V
V_{PWML}	PWM Logic Level Low		0.7	0.9	1.2	V
V_{PWM3T}	Tri-State Open Voltage			1.5		V
$t_{pwm-dly}$	PWM to VSW Propagation Delay ⁽¹⁾	$C_{PWM} = 10 \text{ pF}$ (see Section 7.2.5)		36		ns
t_{3HT}	Tri-state Shutdown Hold-Off Time ⁽¹⁾	$C_{PWM} = 10 \text{ pF}$		24		ns

Figure 24. 锁死复位时序要求

2. 功率级锁死复位时，在 PWM 拉到三态的一刻，发生故障的那颗功率级会将 CSP 短暂拉低 1us，从而给控制器提供一个信号，告诉控制器是这颗功率级发生了故障。使用者在进行电源设计时，需要注意控制器能否识别，是否支持这种 CSP 拉低的信号，尤其是在混搭设计时，这一点会显得更为重要。

4. 多相电源系统性 OCP 保护的理解与应用

4.1 OCL, OCP 和 OCW 设计

控制器和功率级有不同的过流保护种类，每种过流保护有各自的阈值和保护方式。在系统中应用多相电源时，需要结合负载特性和负载需求，控制器和功率级的能力，综合考虑进行过流保护的设计。下面是在设计系统的过流保护时，可以采取的推荐步骤：

1. 确定负载需要的峰值电流(IMAX)和热设计平均电流(TDC)；
2. 确定给该负载供电的相数，需要结合板子面积，系统风速，环境温度，板材以及铜厚综合考虑；
3. 由相数和负载电流可以得到功率级每相的 TDC 和 IMAX，确定使用的功率级型号；
4. 设计 OCL，需要结合使用的电感和功率级综合确定；
5. 设计 OCP，决定保护负载的总电流；
6. 设计 OCW，增加系统设计的完整性。

下面以 Intel Ice Lake 270W CPU VCCIN 多相电源的 OCL, OCP 和 OCW 阈值设计为例，由 Intel Whitley pdg-574174 查表可知，CPU VCCIN 需要的 TDC 为 131A，峰值电流 IMAX 为 398A。

随后，确定给负载供电的相数，一般服务器板子的相数为 7 相，功率级每相的 TDC 为 18.7A，IMAX 为 56.85A，考虑到兼容 turbo 模式下每相电流会达到 65.7A，选定 CSD95410。其在 30A 处有峰值效率 95%，且峰值额定电流为 90A，余量较每相 IMAX 为 58%。电感选择 Coilcraft 的 SLR7010-101KED，饱和电流 I_{sat} 为 113A，额定电流 I_{rms} 为 72A。

下一步是设计 OCL。OCL 会在保证动态性能的前提下，保护电感和功率级不承受过大的电流应力，因为 OCL 的保护是逐周期的，该保护的速度会远快于 OCP，为了更精准的保护，需要优先设置 OCL 的阈值。OCL 的阈值由控制器设置。OCL 在确定之前需要先检查上限和下限。上限需要同时小于电感的饱和电流 I_{sat} 和功率级的峰值额定电流，电感饱和电流为 90A@125°C，CSD95410 的额定峰值电流为 90A，所以 OCL 的上限是 90A。OCL 的下限需要尽可能大于每相峰值电流 IMAX，也就是 56.85A。负载在工作时总是存在动态和调压，为了保证多相电源的动态性能，同时提升功率级的可靠性，OCL 对需要上限和下限均保留余量。在这里选定 OCL 为 80A。

当负载因为异常长时间大电流工作时，如果仅使用 OCL，那么负载可以从 VR 取得的直流电流可以达到 560A 左右，如此大的输出电流能导致负载过热损坏。所以，必须设置 OCP，从总电流和热的角度保护负载，提高系统级可靠性。

OCP 的设计，需要大于负载可能出现的 ICCMAX，并保留一定余量，防止负载在变化时电源进行了误保护，对于大电流的应用场景，可以考虑设置 OCP 在 120%~125% ICCMAX 处，对于小电流的应用可以适当多加一些余量。选定余量之后需要复核每相电流在 OCP 时是否会超过功率级和电感的额定峰值电流。在这里选定余量为 20%，则 OCP 为 477.6A，取整为 478A。每相电流 OCP 时为平均 68.28A，小于 CSD95410 和电感的额定电流。

除了 OCL 和 OCP 之外，OCW 也是多相电源过流保护中不可或缺的一部分。OCW 可以作为在 OCP 之前进行告警，提示上位机电流的情况，补充系统信号完整性。其阈值的设计比较简单，可以设定在 VCCIN 的峰值电流 IMAX 处，即 398A。如 Figure 25 是过流保护的总结。

器件	参数名	参数值
CPU/Intel ICX 270W /VCCIN	TDC	131A
	ICCMAX	398A
功率级/CSD95410	相数	7
	每相电流@TDC	18.71A
	每相电流峰值@ICCMAX	56.86A
	峰值额定电流	90A
电感/SLR7010-101KED	饱和电流	113A
	额定电流	72A
控制器/TPS53688	OCL	80A
	OCP	478A
	OCW	398A

Figure 25. 过流保护阈值设计总结

4.2 多相电源负向电流过流保护 (NOCD)及其机制

控制器和功率级在配置时，不仅可以进行常见的正向过流保护，当下管负向电流过流时，也存在负向电流过流保护(NOCD)，以保护下管不被过大的负向电流损坏。这个保护的实现需要结合控制器和功率级一起。下面以 TPS53688 和 CSD95410 为例说明多相电源中 NOCP 的阈值和实现机制。

在介绍 CSD95410 的保护机制时，介绍了负向过电流检测 (NOCD)，当下管负向电流过大时，将触发 CSD95410 的 NOCP，TAO/FLT 被立即拉高到 3.3V。在控制器端，TPS53688 会监控 TAO/FLT 电压，当 TSEN 超过 2.6V 时，如 Figure 26 所示，控制器会认为功率级发生了故障

(Power stage fault)。控制器会根据寄存器 MFR_PROTECTION_CONFIG 的 PSFLT_RESP[33:32]判断执行哪一种保护方式。

V _{PSFLT}	ATSEN/BTSEN pin voltage causing Power stage fault (TAO HIGH)		2.6	V
	ATSEN/BTSEN pin voltage clearing Power stage fault (TAO HIGH)		2.4	V
	ATSEN/BTSEN pin voltage hysteresis for Power stage fault (TAO HIGH)		0.2	V

Figure 26. 控制器端 TAO/FLT 告警阈值

如 Figure 27 所示，通过设置 PSFLT_RESP，可以选择忽略，打嗝或者锁死三种保护方式。PSFLT_RESP 默认的设置 为 10h，锁死方式。

PHFLT RESP	Converter Response Response
00b	Continue uninterrupted
01b	Hiccup immediately
10b	Latch off immediately
11b	Reserved

Figure 27. PSFLT_RESP 响应设置

需要注意 TPS53688 从 TAO/FLT 拉到 2.6V，到 PWM 进入三态的延时为 25uS 左右。

下面以 TPS53688 和单相 CSD95410 做 1.8V 到 0.5V 的 DVID down 触发 NOCD 为例，详细解释控制器和功率级配合时的保护机制。

如 Figure 28 所示，输出空载，人为将输出电压做 DVID down，从 1.8V 到 0.5V，电压调整率为 30mV/us。可见电感电流快速进入负向并迅速变大，到达 -55A 左右触发 NOCD，同时 TAO/FLT 上拉到 3.3V。

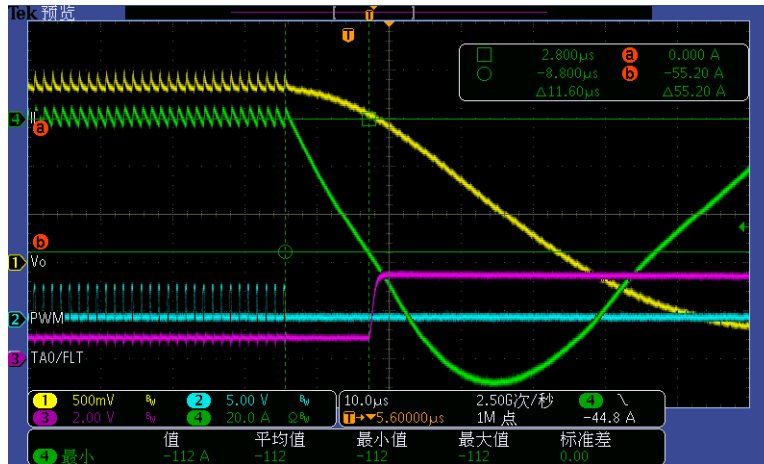


Figure 28. 负向过流保护实测波形

5. 结论

输出过流保护的设计是多相电源设计中的一环，也是在设计中对细节容易忽视的一部分。多相电源的输出过流保护在不同过流情况下有不同的保护机制和保护阈值，在其他类型 DCDC 常用的 OCF 在多相电源中的保护速度慢，不适合进行短路保护。而 OCL 直接采功率级的电流信号，保护速度快，限流能力强，可以在瞬态时快速保护功率器件以及负载。

另外，功率级的过流保护机制和阈值与控制器不同，尤其是使用者将使用不同控制器和功率级进行混搭设计时，在设计时更需要兼顾两者在过流保护的不同。

参考文献

[1] TPS53688 Datasheet, [sluscy8](#), Texas Instruments.

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 © 2021，德州仪器 (TI) 公司