

1. 两路交错无桥图腾柱T结M_PF结 参考设计简介

随着服务器计算需求的增长，特别是云计算和人工智能（AI）计算的兴起，服务器 CPU/GPU 所需功率在大幅增加，服务器电源的功率预算已经从 21 世纪初的 200W 至 300W 范围，增加到现在的 800W 至 2000W，并且未来可能进一步增加到 3000W/5500W 甚至 8000W 以上。为了满足电子产品对高质量电源的需求，同时，在行业头部企业和节能减排宏观趋势的驱动下，服务器电源的行业标准也将当前国内普遍采用的 CRPS2.2 标准逐渐升级到 M-CRPS 标准，新标准对掉电再恢复的冲击电流、电网电流 THD、PF 值及功率密度等方面提出了更为严格的要求，THD 新旧标准差异如图 1 所示。

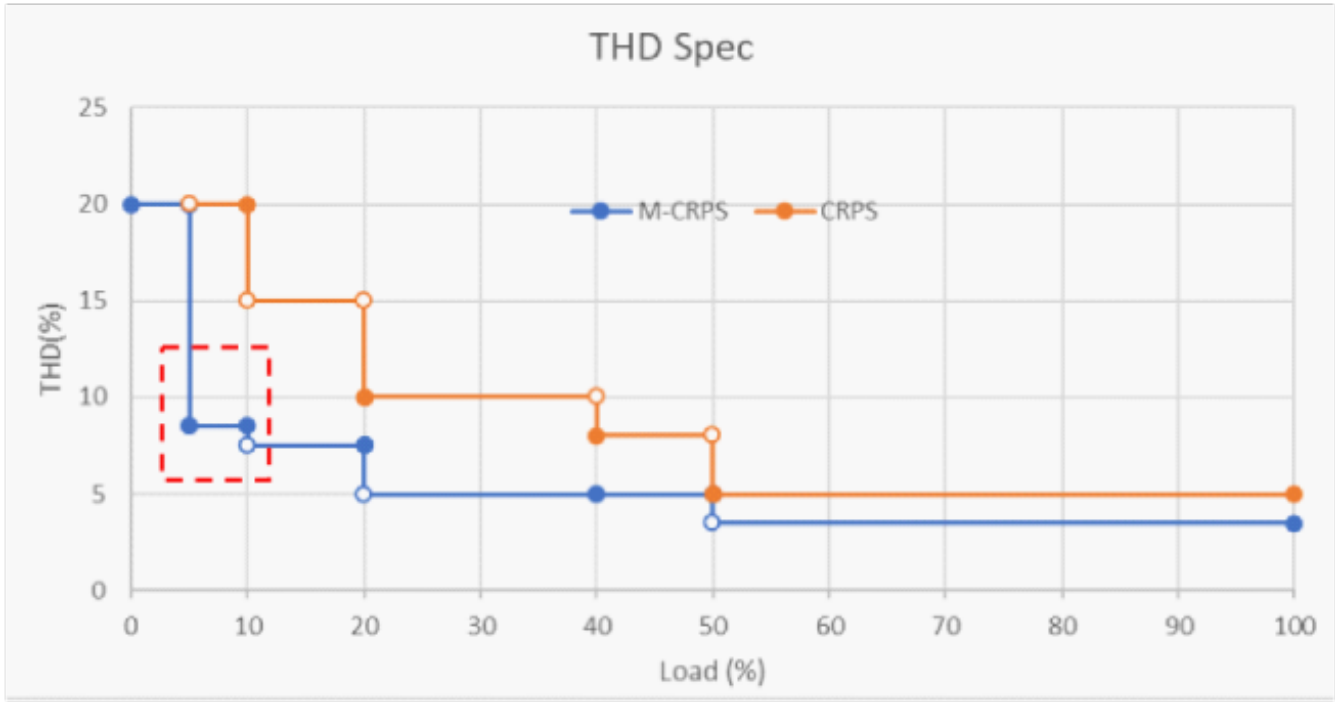


图 1 M_CRPS/CRPS 标准中 THDi 的要求

应服务器电源高效、高功率密度的要求，图腾柱 PFC 相比传统二极管整流 boost PFC 每次能量传输少经过一个开关管、更为高效，因而在服务器电源、通信电源等领域得到了广泛应用，图腾柱 PFC 和传统拓扑的对比如图 2 所示。

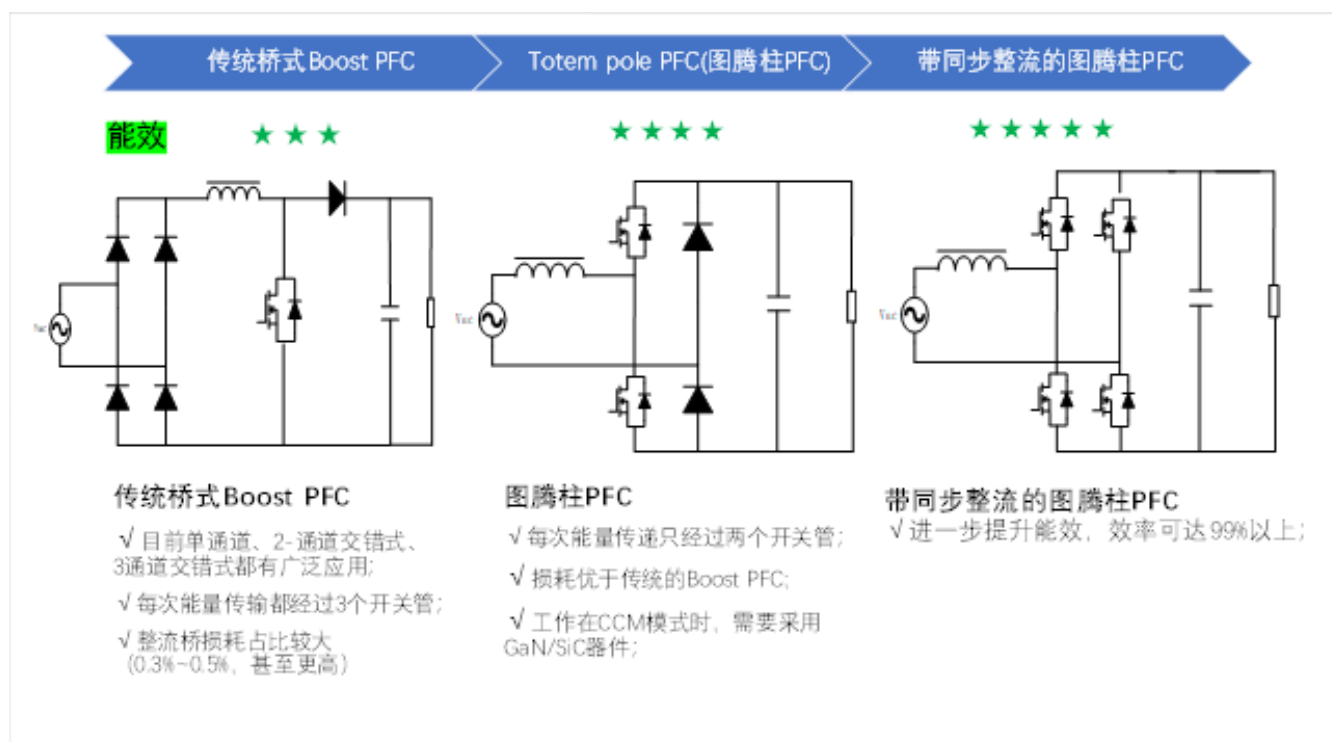


图 2 传统拓扑与图腾柱拓扑对比

为进一步提升图腾柱 PFC 的效率和功率密度, TCM 模式相对于 DCM、CCM、CRM 模式优势明显, 如图 3 所示, TCM 模式有利于实现全负载范围内的 ZVS 开通。在功率等级较高的情况下, 单路 PFC 的输入纹波电流很大, 滤波器的体积也会相应增大。为解决大功率场景中 PFC 电感和滤波器体积过大的问题, 可采用多相 (N 相) 交错技术。采用该技术后, 输入电感电流频率成倍增加, 输入滤波器差模部分所需的截止频率也成倍增加, 因此可极大地降低系统滤波器的体积, 有利于功率密度提升。

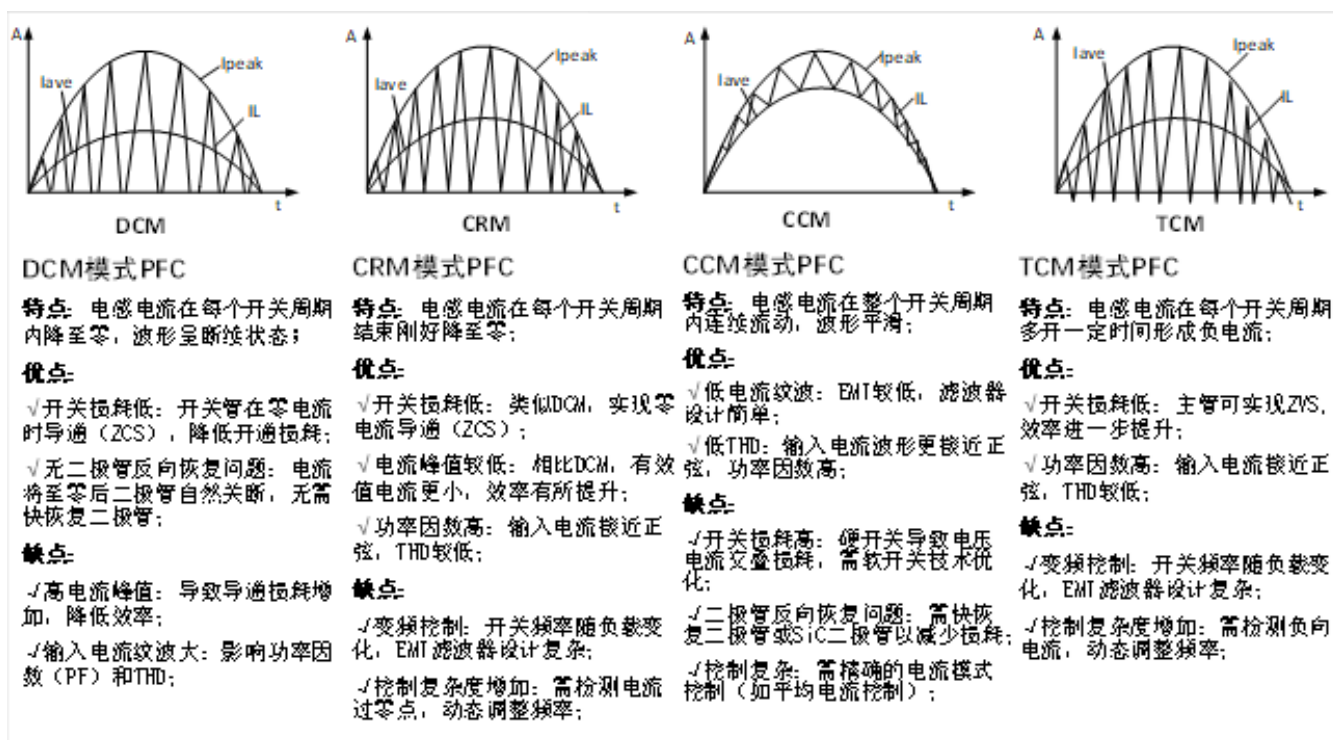


图 3 电感电流工作模式对比

基于上述考虑, 小华半导体推出了基于 HC32F334 芯片的两路交错无桥图腾柱 TCM_PFC 参考设计方案。系统具体控制框图如图 4 所示, 方案采用互感器检测正、负向电流实现整流管 OCP 保护以及续流管负电流关断, 同时实现交错控制。图 5 为满载电流交错以及主管实现 ZVS 的情况。图 6 为参考方案的 THD、PF 值以及效率曲线。参考方案的 THD 与 PF 值指标满足更加严格的 M_CRPS 标准。

方案实现的主要要点与难点如下:

- 1、工频过零点电流畸变控制;
- 2、工频过零点附近的逻辑处理, 包含:
 - a) 对调整流管与续流管的驱动脉冲;
 - b) 切换相应的负电流检测事件配置;
 - c) 切换相应的 OCP 保护事件配置;
 - d) 更改相应的消隐窗口配置;

e) 工频过零点附近驱动关波逻辑;

3、轻载效率和 THD 优化;

4、准确负电流检测与防干扰设计;

5、变频交错功能实现;

6、保护功能设计, 介绍:

a) 电感电流的 OCP 保护;

b) 以及软件防饱和保护;

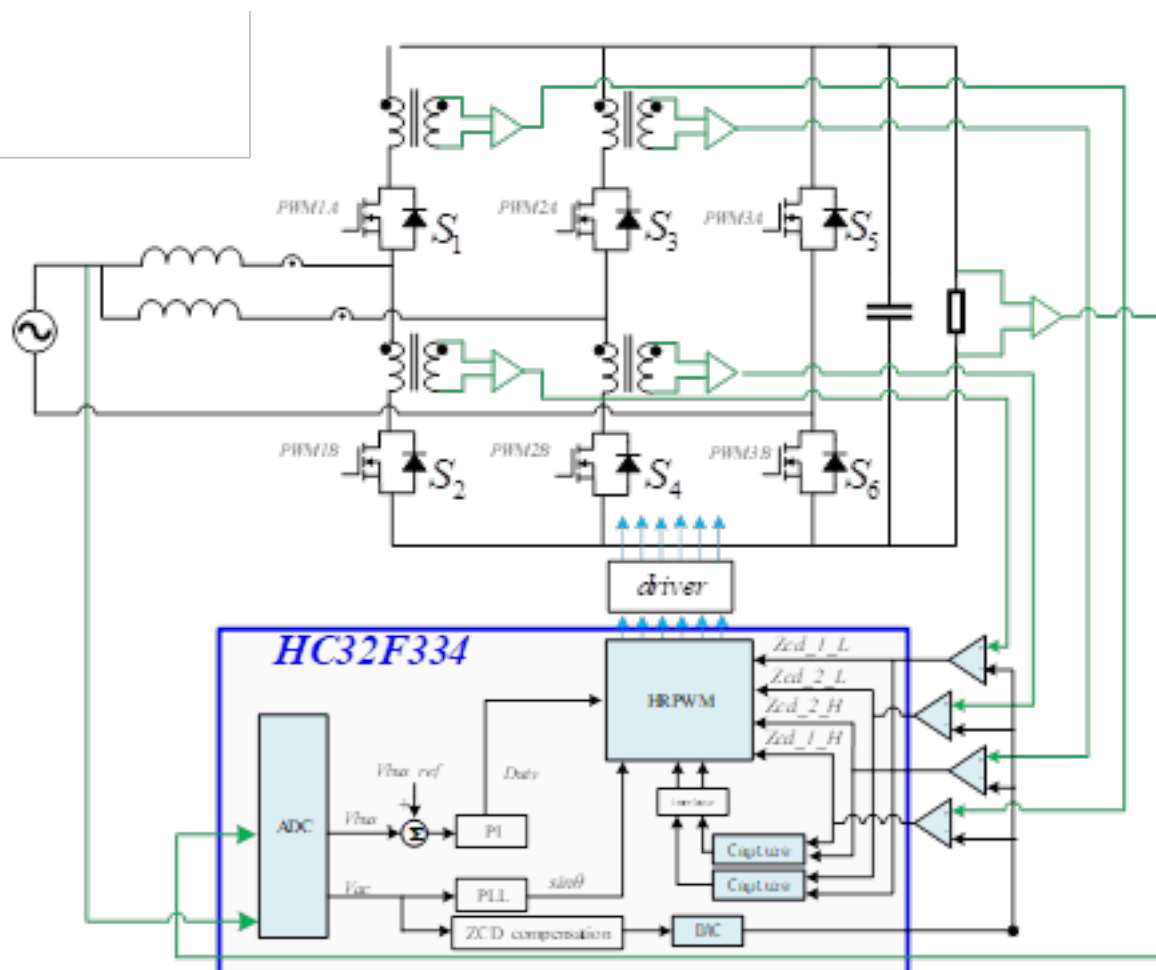


图 4 小华 TCM_PFC 系统控制框图

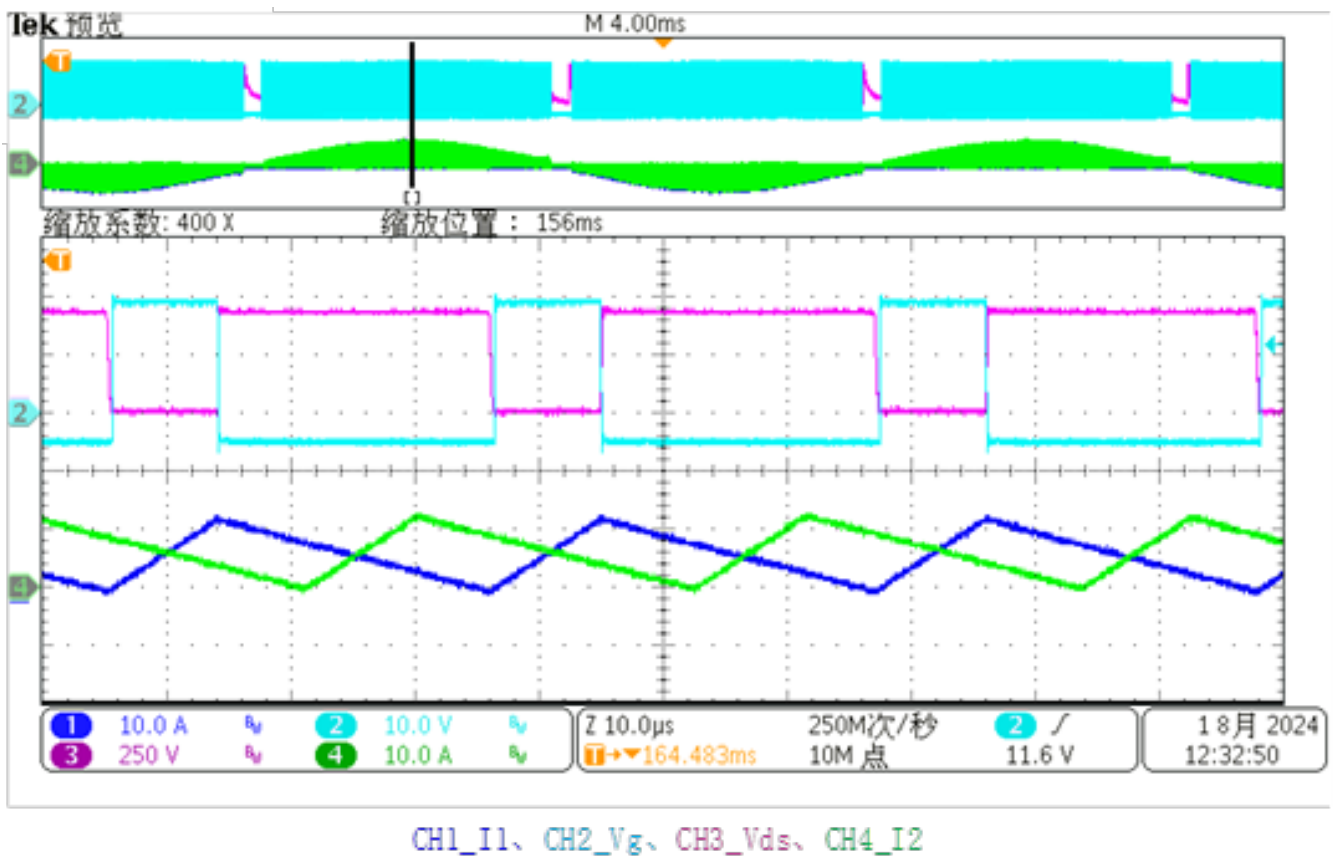


图 5 $V_{in} > V_{out}/2$ 下的 ZVS 实现以及电感电流交错波形

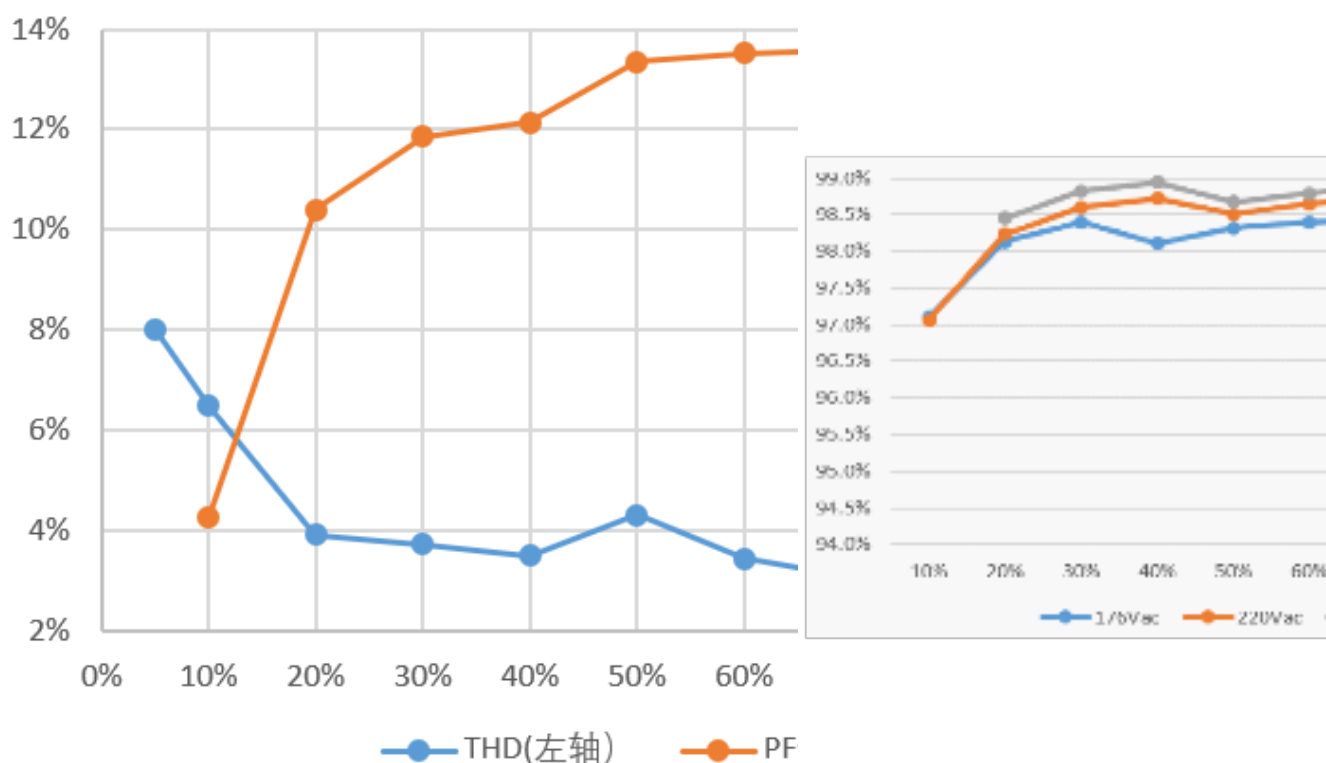


图 6 额定 220V 输入下 THD 曲线(左轴)和 PF 值(右轴)以及不同输入下的效率曲线

2. 方案设计要点

2.1 工频过零点电流畸变控制

在工频过零点附近，受续流管的反向恢复、采样电路延时、驱动电路延时的影响，在负电流达到

阈值后电感电流会继续以 $\frac{V_o - V_{in}}{L}$ 的斜率上升一段时间（绝对值），导致实际关断的负电流会比给定值大一些。然而，在工频过零点附近输入电压瞬时值比较低，电感电流的上升斜率缓慢，会导致过零点附近的 TON 开出来的电流恢复不到负电流给定值以上。最终的结果是 TON 结束后，由于此刻母线电压相对较高，电感电流会以比较大的斜率下降到负向 OCP 保护阈值处，使得工频过零点电流出现尖刺。因此，在电感电流恢复到给定值以上之前的时间要防止开通续流管，同时要保证主管的脉冲在 TON 结束后能够重新开启。

小华 HC32F334 芯片针对上述问题，对外设细节进行了优化处理，以便应对上述问题。芯片增加了外部事件消隐延迟功能，如图 7 所示。工频过零点附近，当负电流持续有效时，在死区时间结束后会清零计数器进而重新开启 TON，直到负电流恢复到给定值以上。本方案中，负电流检测消

隐信号跟随功率管脉冲动态调整，图 8 为未开启消隐延迟功能的发波示意图，图 9 为开启消隐延迟功能的发波示意图。

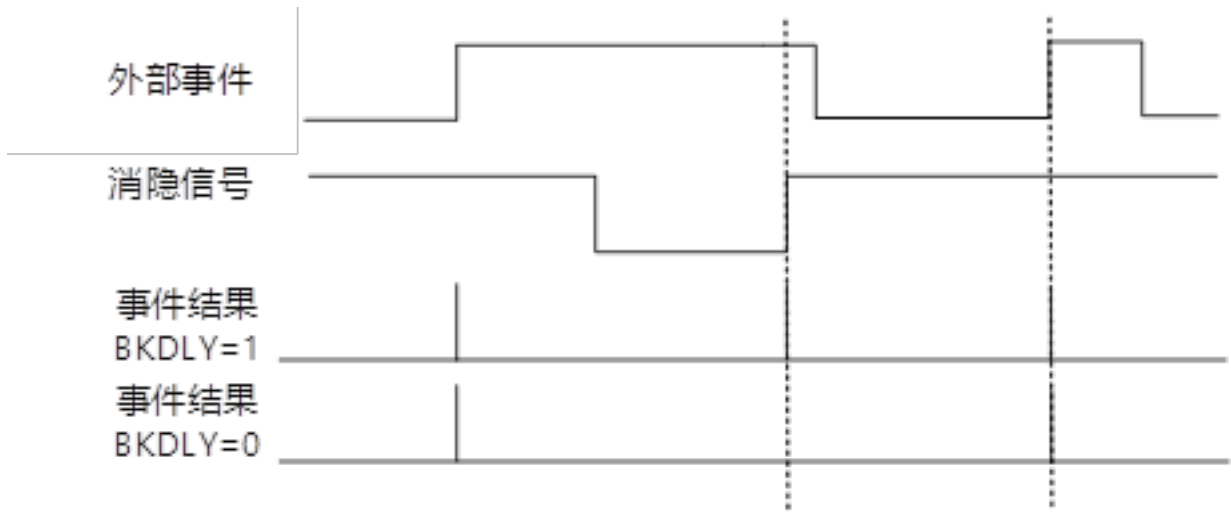


图 7 消隐模式下触发计数器清零的外部事件延迟功能

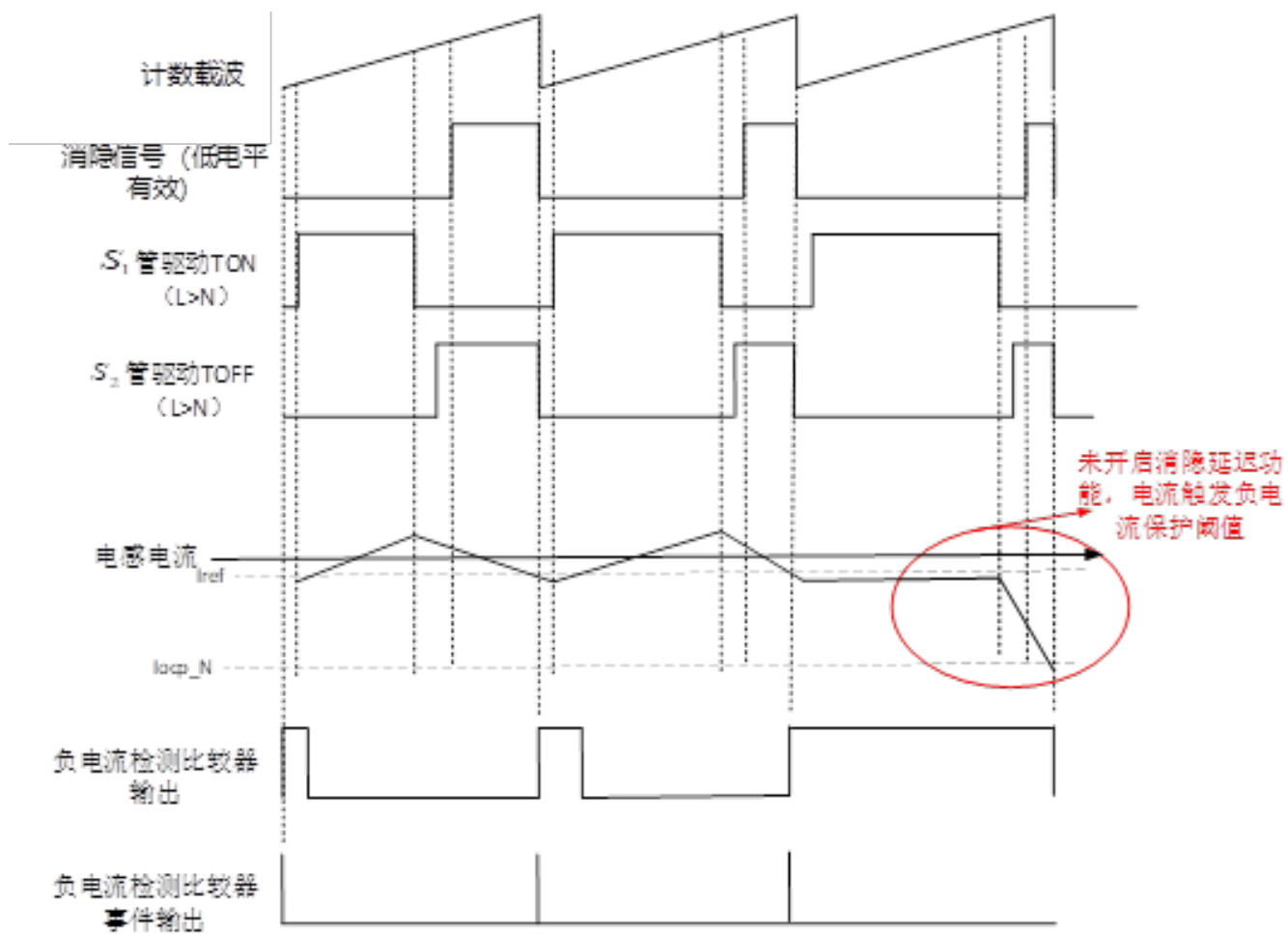


图 8 未开启消隐延迟功能驱动发波示意图

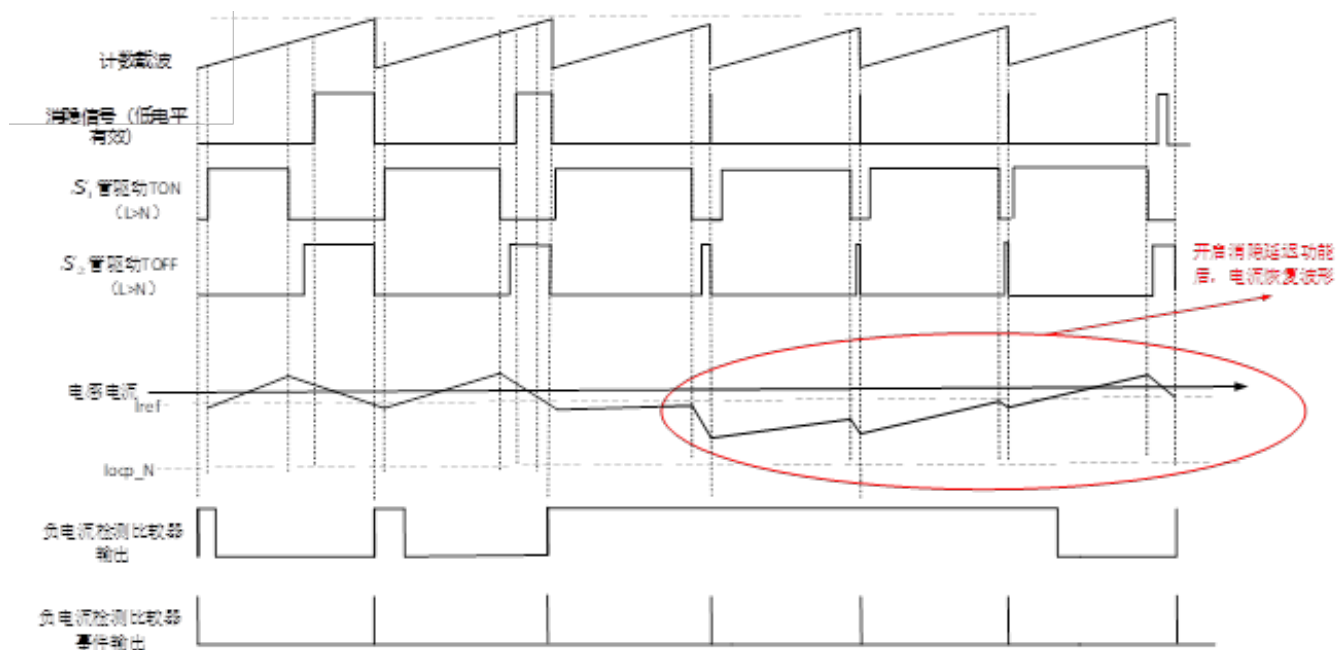


图 9 开启消隐延迟功能驱动发波示意图

未开启消隐延迟功能时，由于工频过零点附近 TON 开启未能使负电流恢复到给定值以上，样机工作异常，频繁的进入负向 OCP 的过流保护，不能正常起机，如图 10 所示。当开启消隐延迟功能时，如图 11 所示，样机正常工作，工频过零点附近电流波形平滑无尖刺。

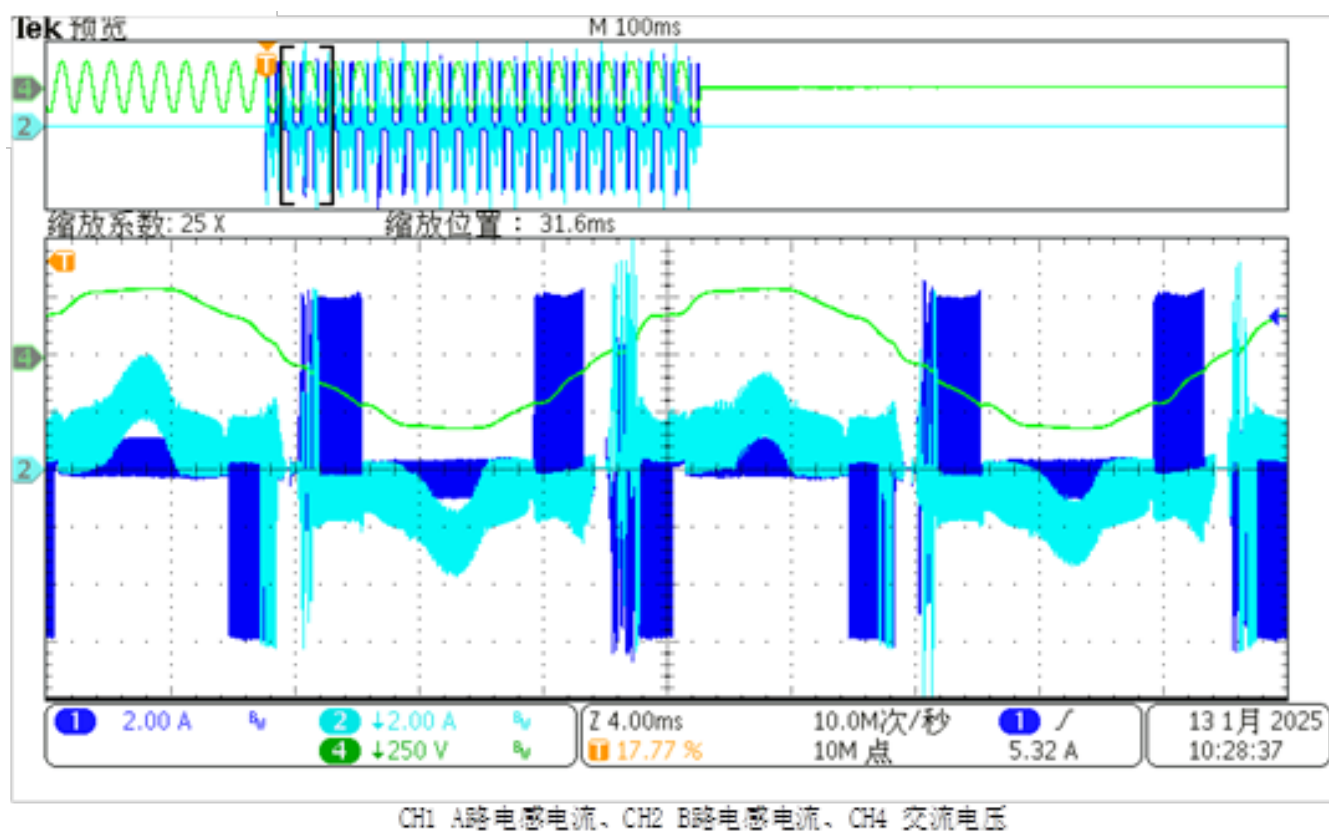


图 10 消隐延迟功能未开启

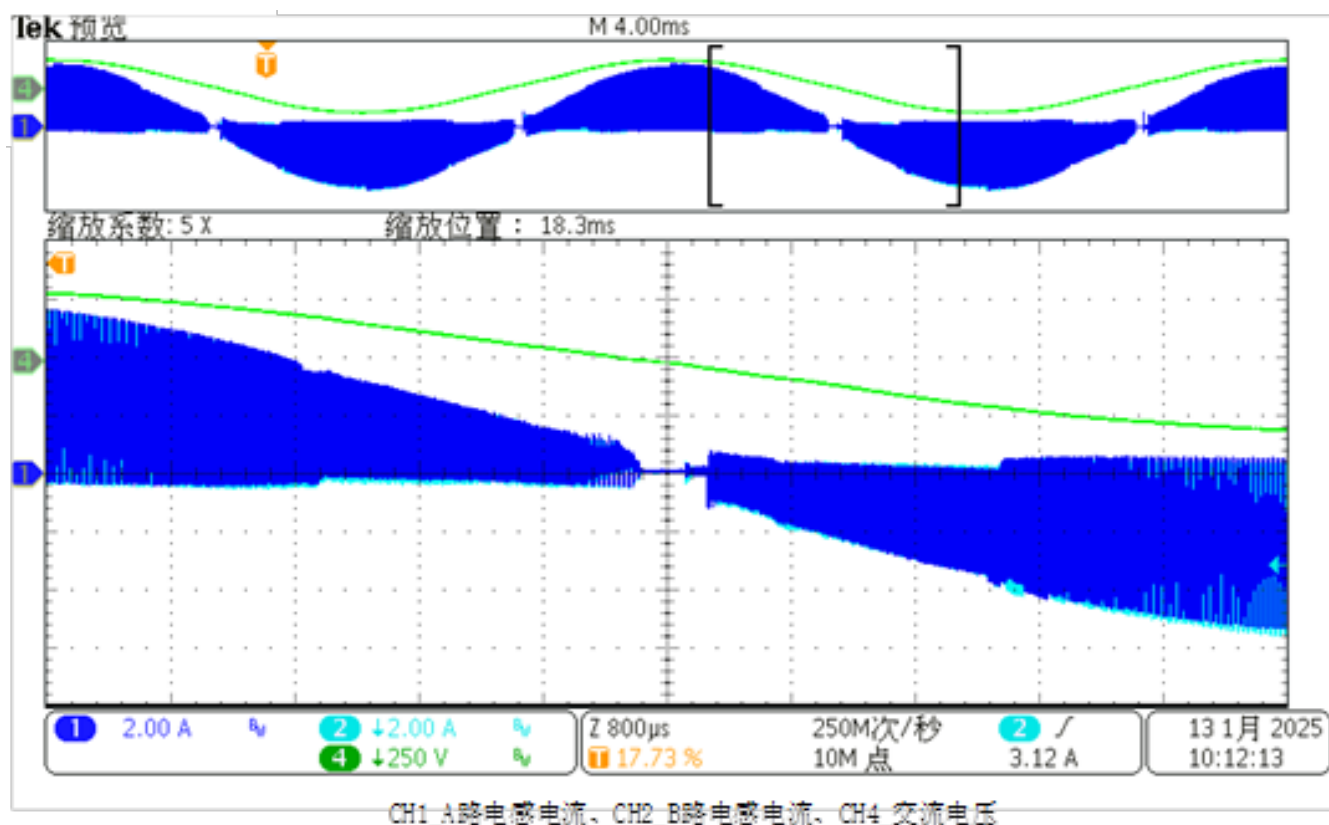


图 11 消隐延迟功能开启

2.2 工频过零点附近的逻辑处理

无桥图腾柱拓扑在工频换相附近，需要处理以下逻辑：

序号	逻辑事项	小华HC32F334对应功能
①	切换 $S_1(S_3)S_2(S_4)$ 的驱动脉冲、更改相应的消隐窗口	HRPWM外设SWAP功能配置使能、切换 $S_1(S_3)S_2(S_4)$ 消隐模式选择
②	切换相应的负电流检测事件配置	更改寄存器，配置使能 $S_1(S_3)$ 或 $S_2(S_4)$ 开通时对应的负电流检测外部事件
③	切换相应的OCP保护事件配置	更改寄存器，配置使能相应的外部事件
④	工频过零点附近驱动关波逻辑	使能EMB的端口保护功能，通过操作CP10实现工频过零点附近驱动关波
⑤	工频过零点附近的开波缓起逻辑	高频缓起、同时更改不同优先级的发波寄存器值限制脉宽

基于 HC32F334 芯片外设优异的性能，以上逻辑均可以通过配置外设轻松搞定。通过 HRPWM 外设的 swap 功能，可配置寄存器实现逻辑①对调整流管与续流管的驱动脉冲逻辑。由上一章节介绍的消隐窗口，通过配置更改事件的消隐模式即可实现逻辑①更改相应的消隐窗口配置的需求。HRPWM 外设发波单元可配置选择 10 个外部事件中任一个或多个作为清零、捕获、PWM 动作的触发源，更改寄存器配置可轻松实现逻辑②、③负电流检测以及 OCP 保护逻辑的切换配置。

逻辑④实现的一般方法是通过在环路中断程序中判断标志位后操作寄存器来关闭驱动脉冲，这样做的缺点是每个环路中断中必须要软件干预才可以，同时开关波会有跟中断服务函数相等时长的延时，另外关断逻辑还会跟控制耦合在一起，增加逻辑的复杂性。利用 HC32F334 芯片的 EMB 外设可轻松搞定上述问题。配置 EMB 外设的端口保护功能，过零点附近操作 GPIO 口的置高置低来提供 EMB 外设的端口保护源，保护功能配置为状态释放，这样无需软件干预即可释放驱动脉冲。过零点附近的驱动关波波形以及驱动切换如图 12 所示。

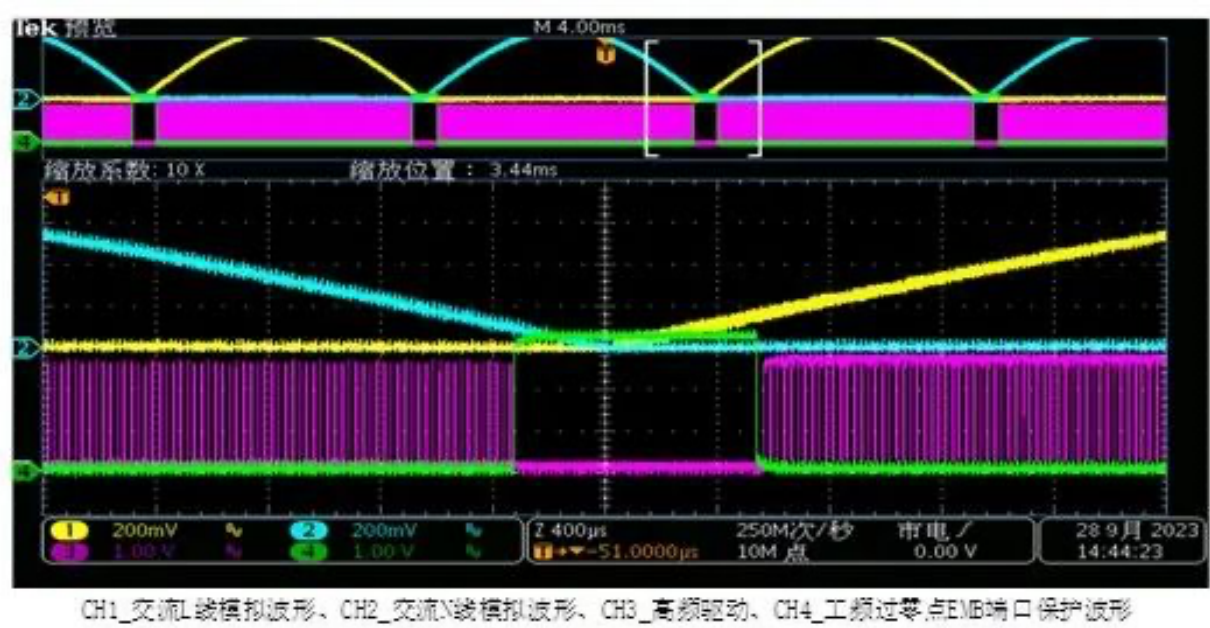


图 12 工频过零点驱动波形图

另外，HC32F334 芯片的 HRPWM 外设包含丰富的事件用来控制 PWM 输出，如相比于竞品，HC32F334 的事件更多：除周期点、零点外，有 6 个比较寄存器动作点，和 10 个外部事件输入动作源。并且在计数器的上升计数，下降计数时可以配置不同的输出状态。

表 1 PWM 控制事件

寄存器	Set High	Set Low	Hold	Toggle
STPCA	✓	✓	✓	×
STACA	✓	✓	✓	×
HRGCMAR	✓	✓	✓	✓
HRGCMBR	✓	✓	✓	✓
HRGCMER	✓	✓	✓	✓
HRGCMFR	✓	✓	✓	✓
HRPERAR	✓	✓	✓	✓
ZERO	✓	✓	✓	✓
Extern Event	✓	✓	✓	✓
SCMAR	✓	✓	✓	✓
SCMBR	✓	✓	✓	✓

基于 HC32F334 芯片如此灵活的发波性能，配置高频臂的驱动如图 20 所示，在环路中断中分别更改寄存器 HRGCMAR、HRGCMER 的值即可分别实现 S_2 、 S_1 驱动的脉宽缓起的逻辑。

2.3 轻载效率和 THD 优化

本文采用的 TCM 模式是 CRM 模式的衍生，其共同点是电感电流均为三角波，不同点是，CRM 模式电感电流最小值为 0，而 TCM 模式电感电流最小值为负值。因此，TCM 模式下得 THD 可参照 CRM 模式类比过来，将 TCM 模式下的电流平均值补偿为 CRM 模式下的平均值即可得到与 CRM 模式下相同得 THD 效果。如图 13 所示为 TCM 模式下电流补偿示意图：

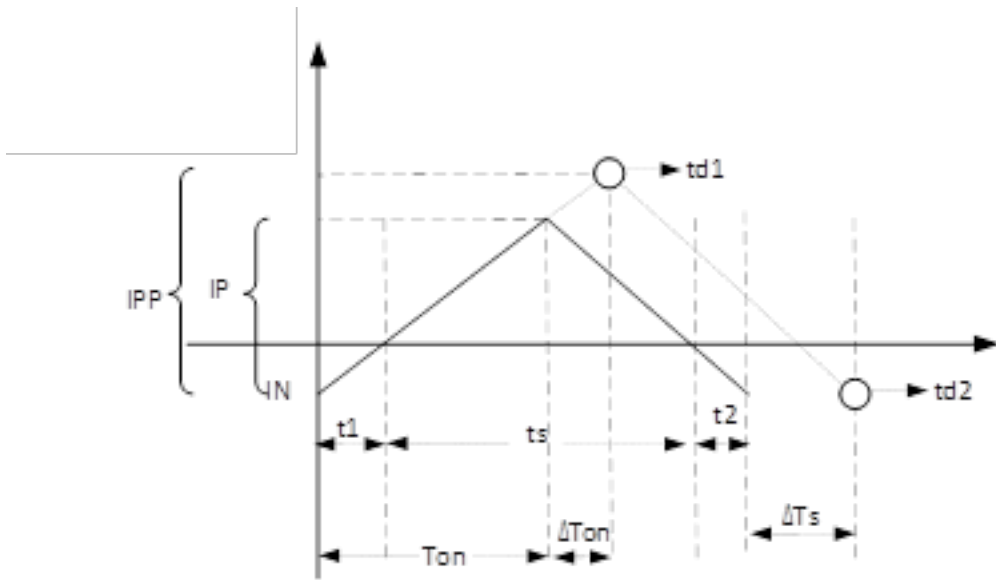


图 13 TCM 模式下 THD 补偿图

TCM 模式下得电感电流平均值与 CRM 模式下得电感电流平均值相等，可列出等式：

$$\frac{(ts+\Delta Ts+td1)*(IPP-IN)-(Ts-ts)*IN}{2*(Ts+\Delta Ts+td1+td2)} = \frac{Ip}{2}$$

求解 ΔTon

令 $p = \frac{Vo}{Vo-Vin}$ ，解得：

$$\Delta Ton = \frac{Lp*IN}{Vin} - \frac{Ton}{2} - \frac{td1}{2p} + \sqrt{\left(\frac{Lp*IN*Ton}{Vin} + \frac{Ton^2}{4} - \frac{td1*Ton}{2p} + \frac{td1^2}{4p^2} + \frac{td*Ton}{p}\right)}$$

小华 HC32F334 芯片为基于 32bit Cortex-M4F CPU，内置 FPU，同时具备最大 128KB 的 Flash memory，因此上述算法软件实现可通过公式计算或者查表的方式轻松实现。补偿后的波形如图 6 所示，满足 M-CRPS 标准要求。

另外，为了提高轻载效率以及 THD，方案在 40%负载以下工作在单路模式，这对输入滤波器提出了更高的要求。如图 14 所示，为方案中采用两级滤波器仿真模型图以及滤波器的幅频特性。

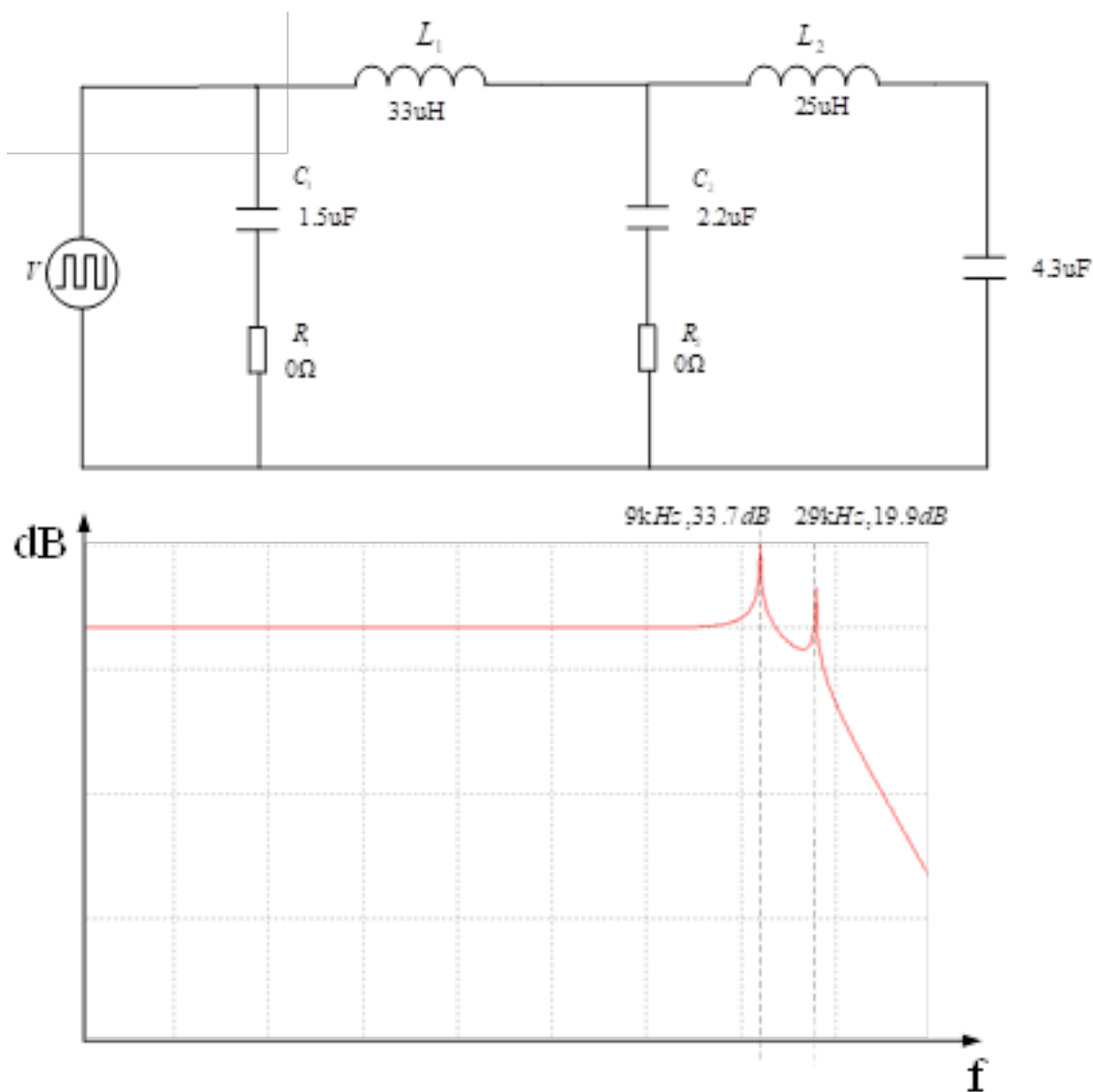


图 14 输入滤波器特性仿真

如图 14 所示，滤波器包含两个谐振频率，本方案中两路工作模式切换至单路工作模式后，工作频率相比两路工作模式下会降低，进而穿越如图 14 所示的最右侧的谐振频率。由于该谐振频率点的衰减系数突然变小，同时由于是工作在 TCM 模式下，电感电流波形为三角波，幅值比较大，这样位于谐振点附近的电感电流衰减系数不够，导致三角波电感电流几乎无衰减。在输入滤波器看进去的电流如图 15 所示，滤波器在谐振频率 29kHz 处对电感电流几乎无衰减。如果将滤波器的谐振频率降低，必然要增加差模感量或者 X 电容容值，这样会导致输入滤波器的插入损耗进一步增加或者导致无功电流增加影响 PF 值。

本方案通过在 X 电容上串入电阻，很好地解决了上述问题，串入电阻后的滤波器波特图如图 16 所示。

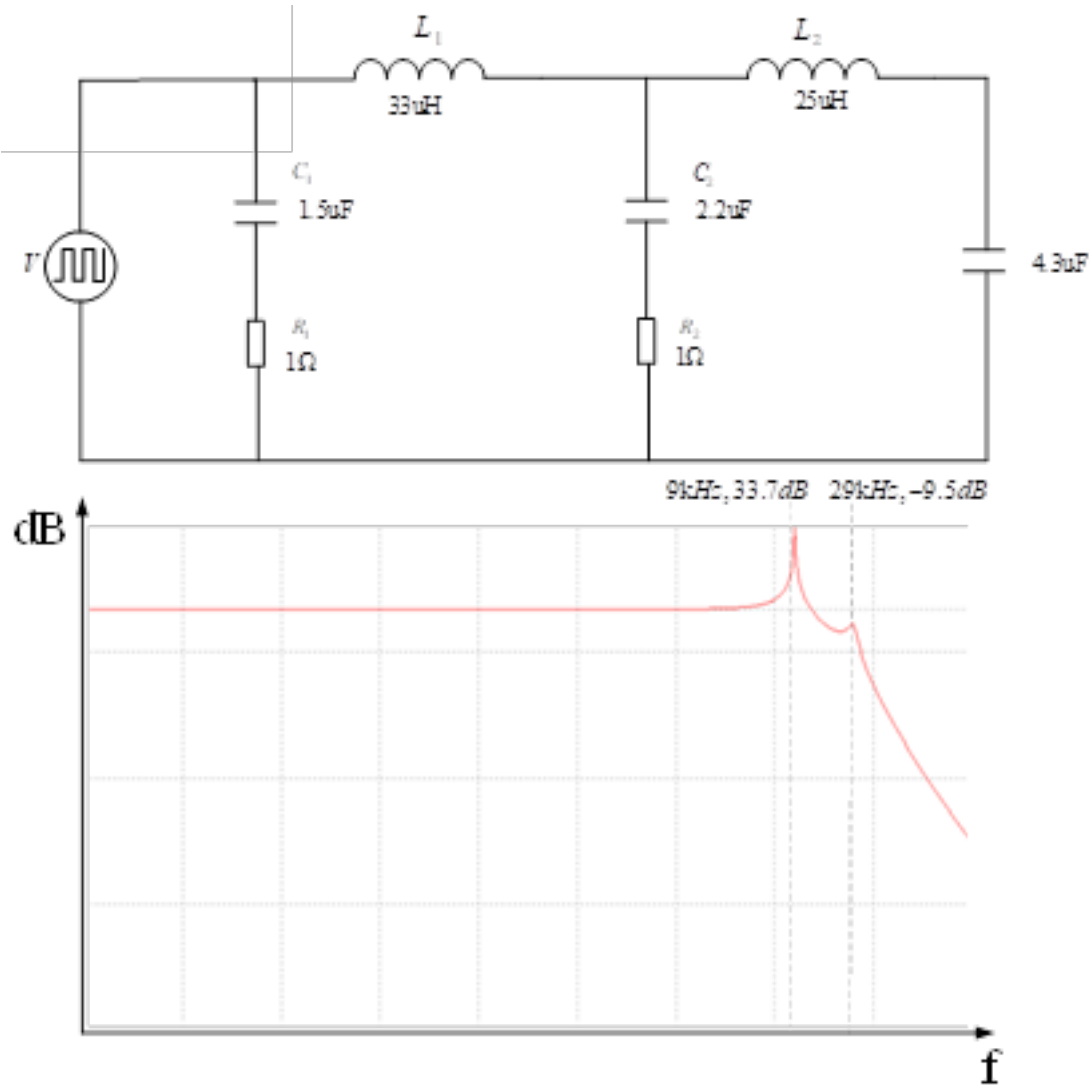


图 16 X 电容串电阻后的滤波器波特图

2.4 准确负电流检测与防干扰设计

TCM 模式下的 PFC 工作在变频模式，频率范围可由 20kHz 至 300kHz 区间变化，因此负电流检测对检测回路的带宽要求较高，参考方案使用高频互感器进行检测，如图 17 所示。当电流从互感器 T1 的 7 引脚流向 8 引脚，Q4 和 Q5 开通进行正向电流的 OCP 检测，以及 ZCD 电流的检测；当互感器不检测电流（ S_2 关断），Q4 和 Q5 关断，互感器 T1 由 D17 进行退磁。与 S_2 、 S_1 串联的互感

器采样回路分别实现了 S_2 的 OCP 采样与 S_1 的负电流采样，采样波形如图 18、19 所示。采样波形分别经过高速比较器输出至 MCU 芯片 HRPWM 外设，经过 HRPWM 外设灵活的外部事件处理性能实现逐周期的 OCP 电流保护功能以及负向电流检测功能。

如图 20 所示，为高频臂驱动发波示意图。HC32F334 的 HRPWM 外设具备外部事件消隐功能，可以忽略指定时间发生的外部事件，其中指定消隐时间配置非常灵活，用户可以通过寄存器设置选择下面任意一种模式：

- ①消隐时间可以由本单元滤波偏移寄存器 EEFOFFSETAR 到窗口寄存器 EEFWINAR
- ②其他单元生成的消隐信号
- ③其他单元的 PWM 信号：PWMA_PRE1 或 PWMB_PRE1
- ④本单元计数值等于周期值或者锯齿波硬件清零到偏移值 EEFOFFSETAR（或窗口值 EEFWINAR）的时间
- ⑤本单元计数值等于 0 到偏移值 EEFOFFSETAR（或窗口值 EEFWINAR）的时间

本参考方案中，因 OCP 电流保护与负向电流检测两路事件为弱信号，在管子动作时很容易受干扰。HRPWM 外设针对外部事件可配置消隐窗口，在消隐窗口时间内可忽略外部事件作用。因此，针对 OCP 保护以及负电流检测事件分别做了内部消隐。得益于 HC32F334 芯片外部事件灵活的消隐功能，本参考方案可分别对 OCP 事件配置消隐模式④，对负向的电流检测事件配置消隐模式⑤，进而保证驱动以及保护不受干扰，正确运行。

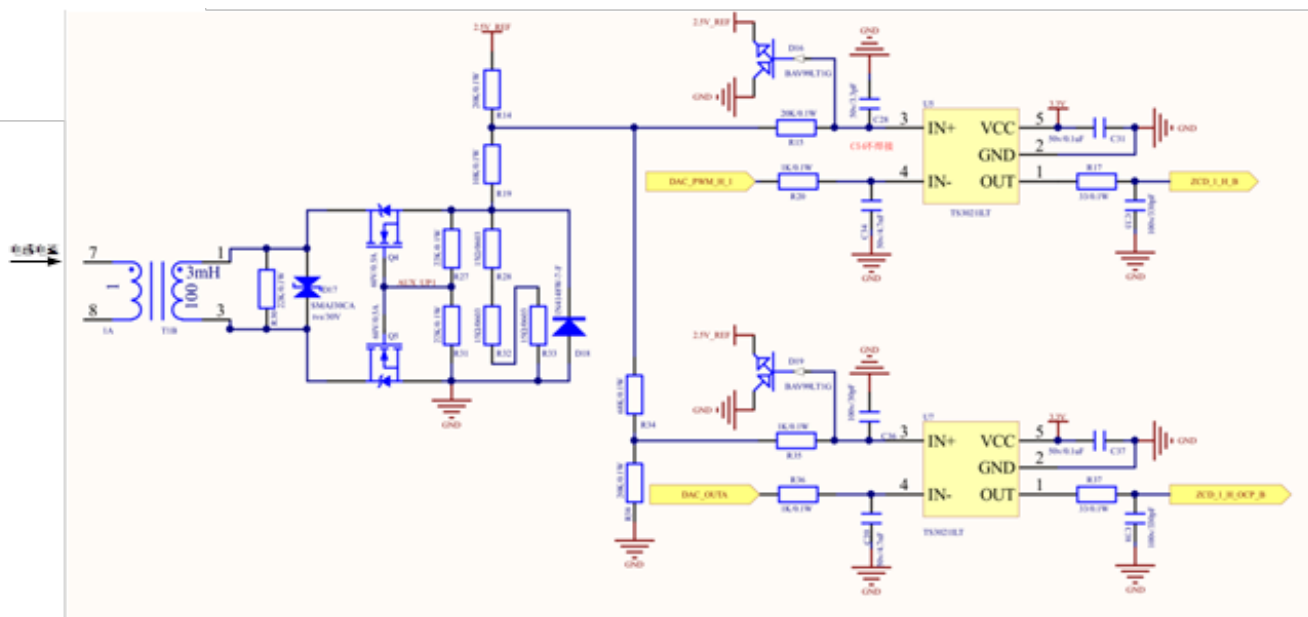
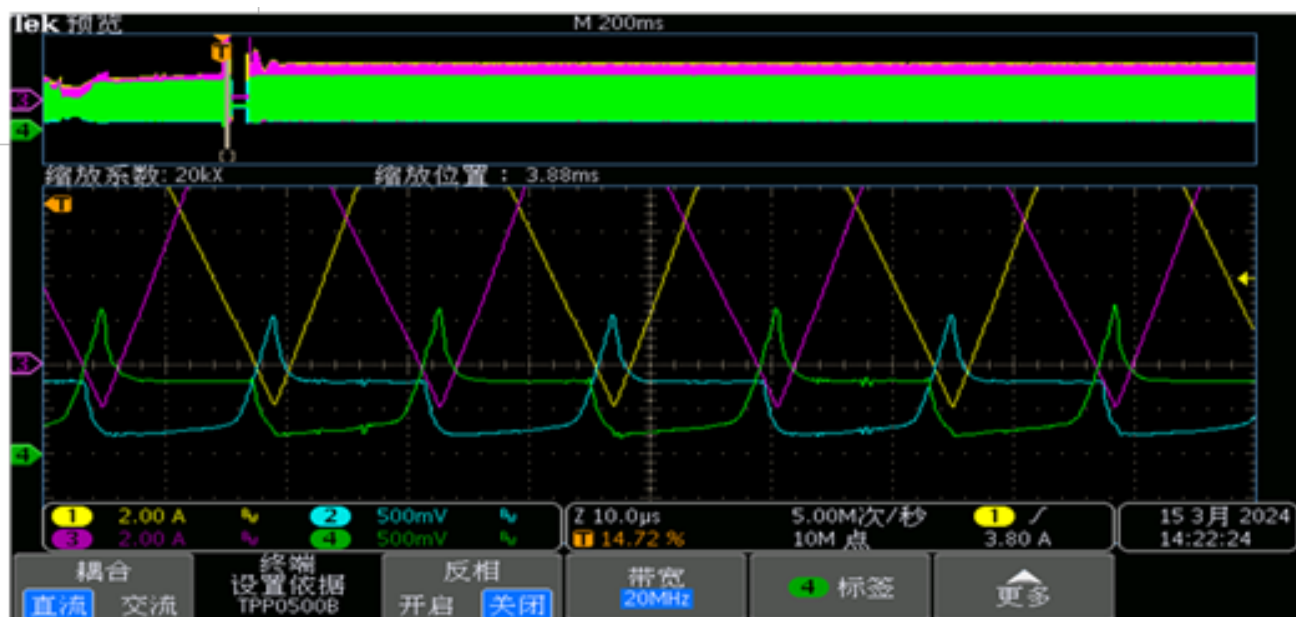
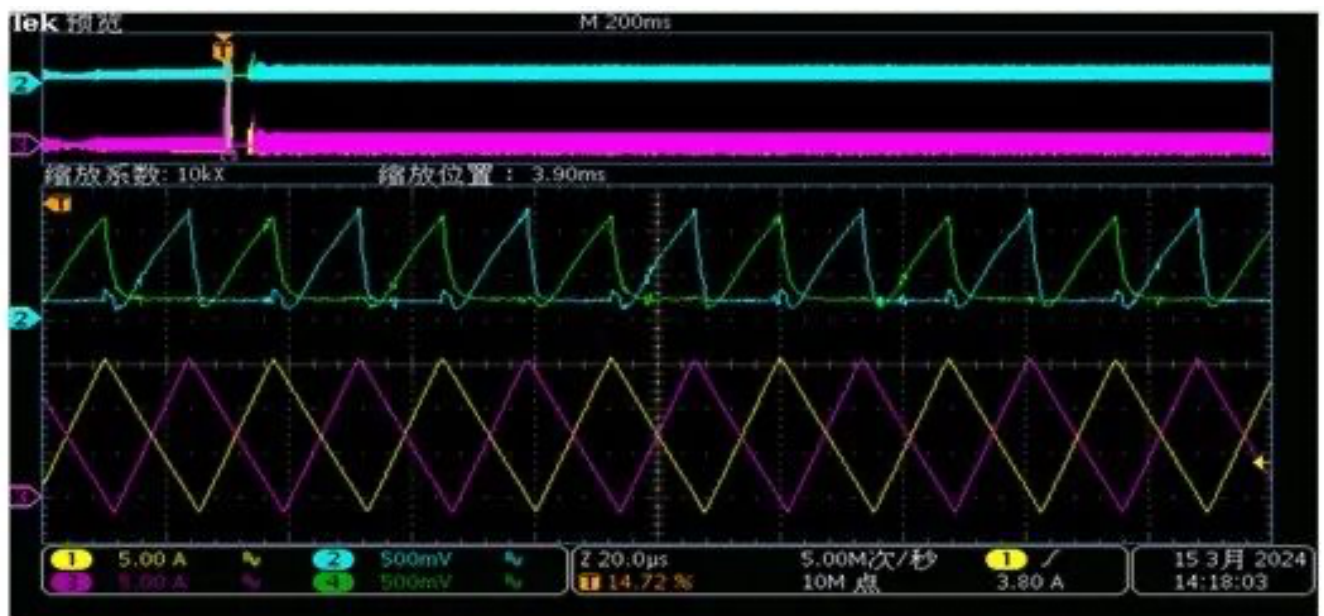


图 17 电流检测电路



CH1_A路电感电流、CH2_A路电感负电流采样、CH3_B路电感电流、CH4_B路电感负电流采样

图 18 续流管负电流采样波形



CH1_A路电感电流、CH2_A路电感OCP电流采样、CH3_B路电感电流、CH4_B路电感OCP电流采样

图 19 主管 OCP 电流采样波形

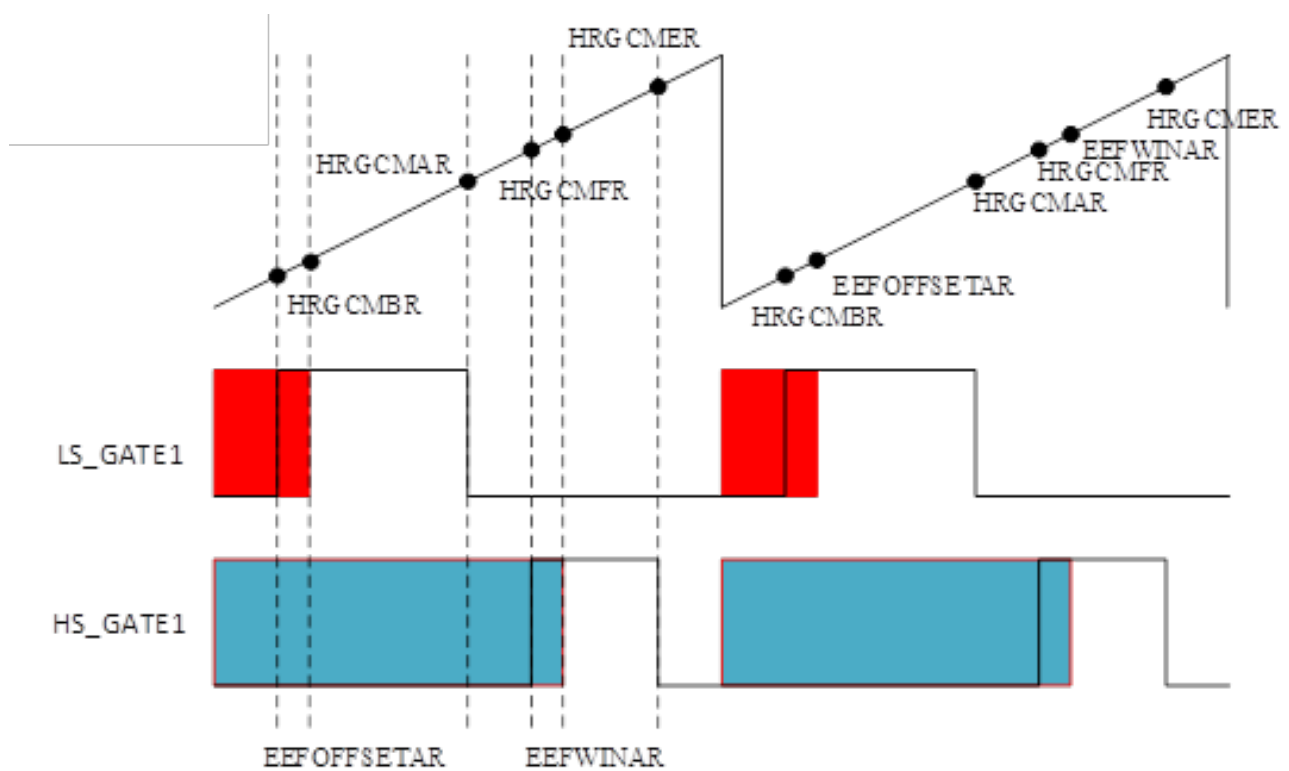


图 20 基于 HC32F334 的 TCM_PFC 高频臂驱动发波配置示意图

2.5 变频交错功能实现

本参考方案中两路交错 TCM_PFC 在变频控制时，需实时矫正两路相位差，以便保证两路能够可靠交错。HRPWM 模块每个单元 timer 都支持 PWM 输出和捕获功能同时使能，每个单元都有两路捕获功能，因此第一路 timer 既可以通过本单元 ovf 事件触发本单元捕获，测量出本路的开关周期 T，还可以通过第二路 timer 的 ovf 事件触发第一路 timer 的捕获功能，从而得到从路相对于主路的

相位 P，进而计算出当前实时检测到的相位 P 与理论目标相位 $\tau/2$ （180°）的差：

$\Delta t = \tau/2 - P$ ，而后通过占空比微调使得从路相对于主路的相位保持在 180° 左右。如图 21 所示，两路电感电流实现了可靠的交错。

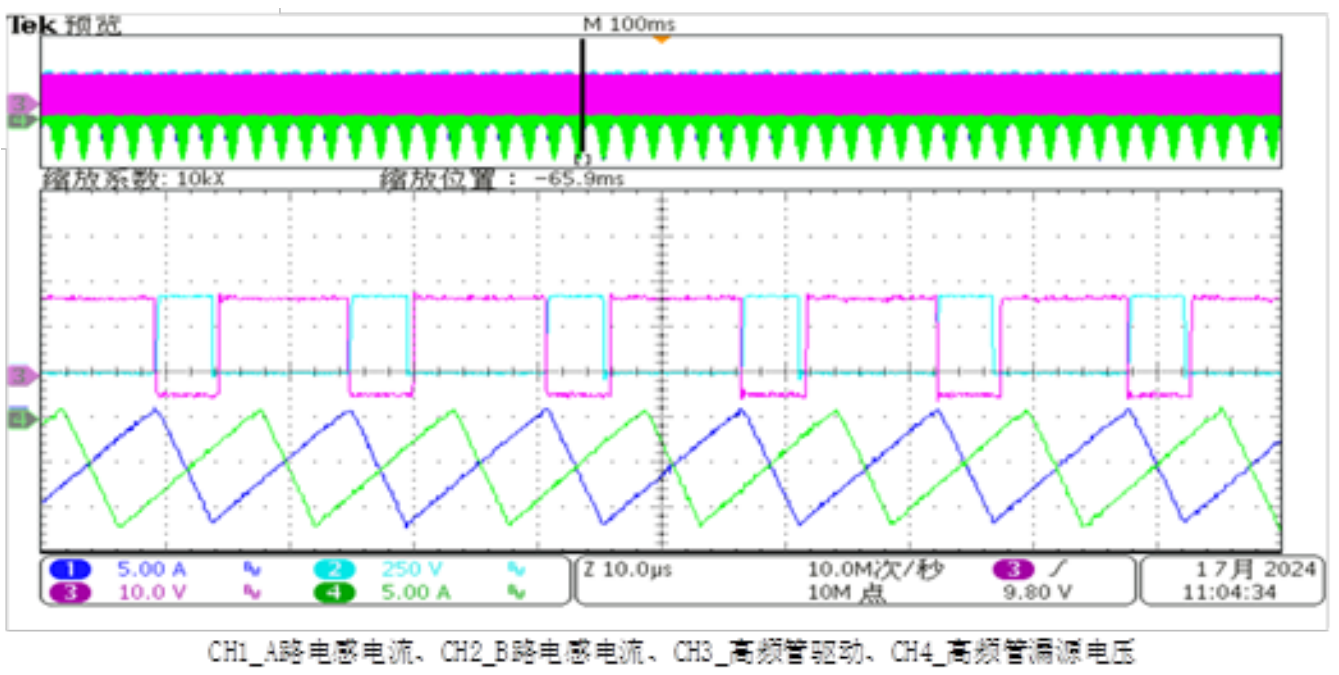


图 21 两路电感电流波形以及主路的驱动与 Vds 波形

2.6 保护功能设计

如图 22 所示，为方案中高频功率电感的饱和电流测试波形。PFC 电感饱和后，感量会急剧下降，进而会导致严重的功率损坏。因此，PFC 电感的防饱和和保护功能至关重要，除了单周期的 OCP 功能外，控制软件中还需增加一层保护。

控制软件依据公式（2-1），通过查询输入电压瞬时值来限制 TON 得大小来间接限制 I_{coil_pk} 得大小。

$$L \cdot I_{coil_pk} = V_{AC} \cdot TON = N \cdot A_e \cdot \Delta B$$

(2-1)

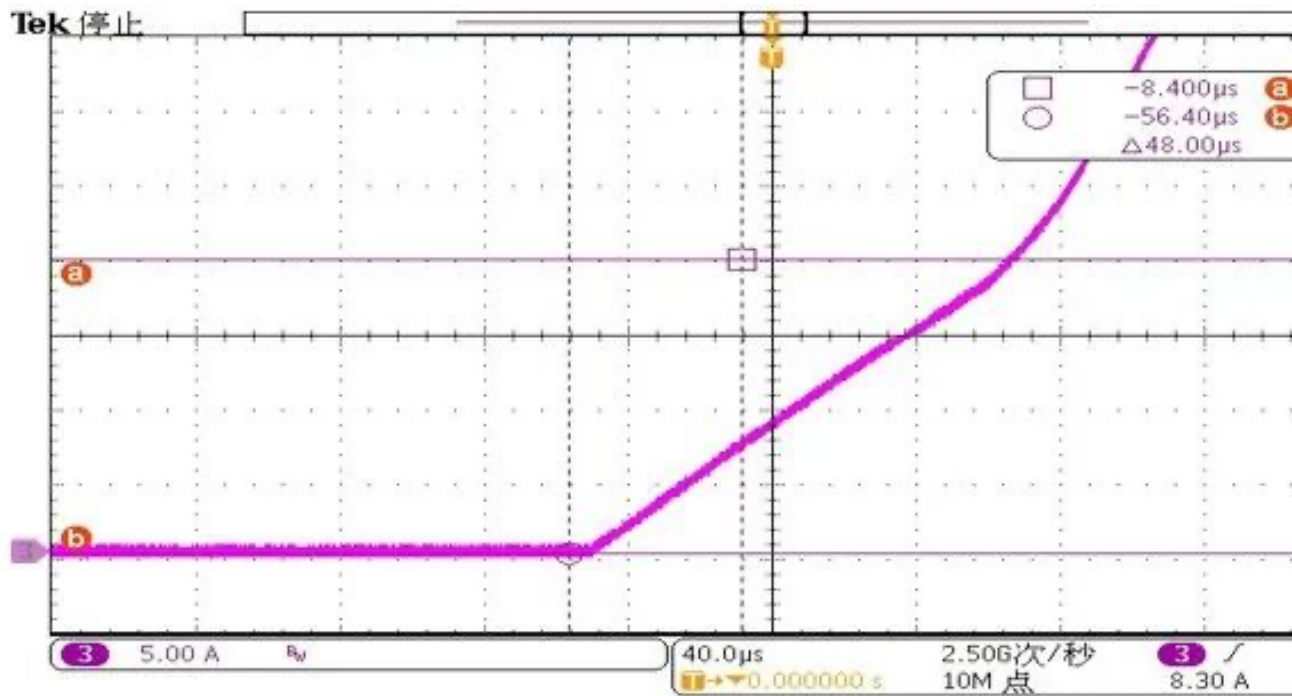


图 22 高频电感饱和电流波形测试图

3. 交错无桥图腾柱 TCM_PFC 应用方案扩展

随着以 SiC 和 GaN 为代表的第三代宽禁带半导体的发展，以及高性能 MCU 数字电源处理器的不断升级迭代，基于 CCM 模式的无桥图腾柱应用将会越来越广泛。小华 HC32F334 也能很好地支持基于 CCM 模式的无桥图腾柱拓扑控制策略，系统框图如图 23 所示。欢迎大家开发探讨。

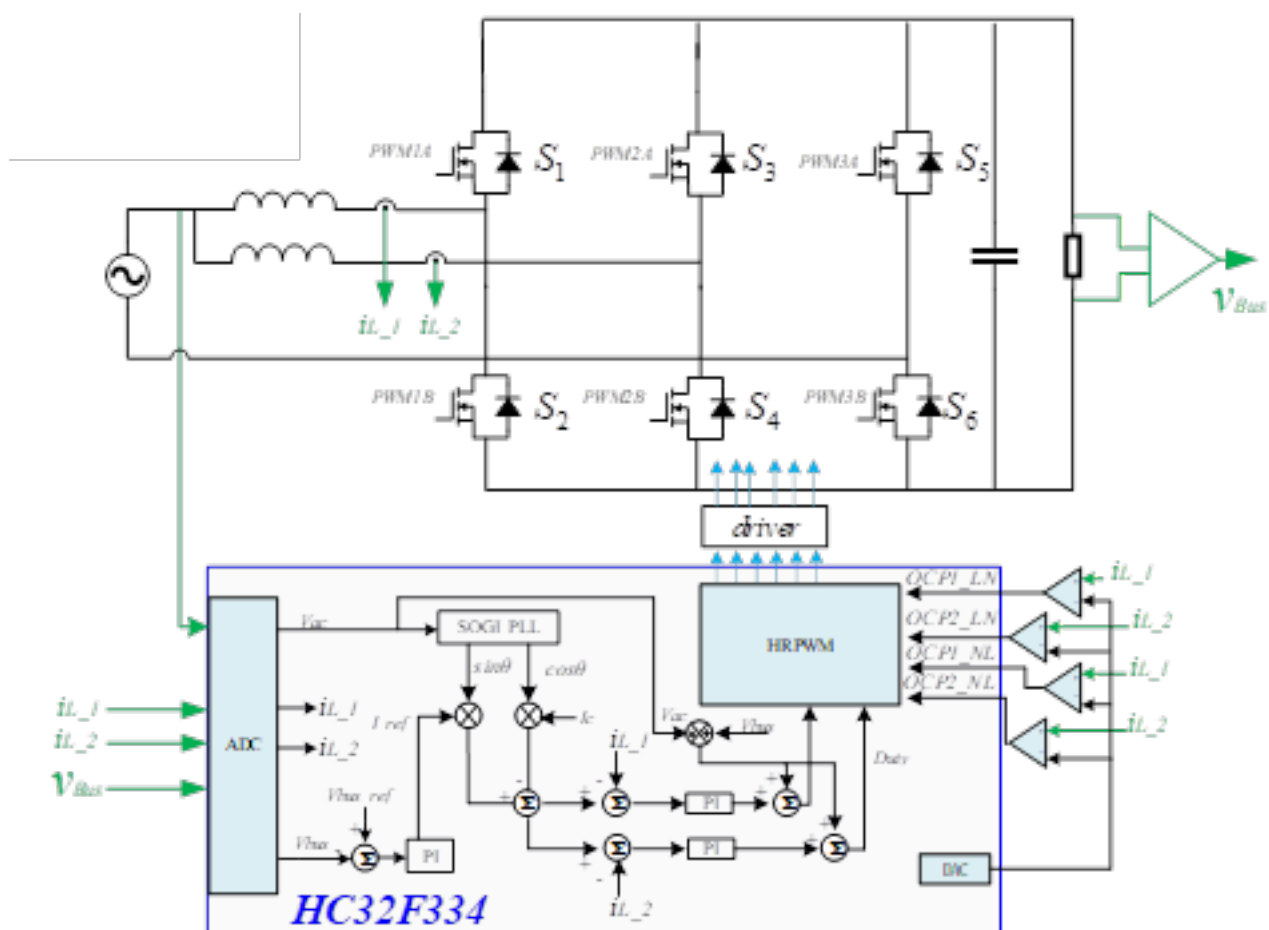


图 23 两路交错无桥图腾柱 CCM_PFC 系统框图

4. 总结

随着 AI 和人工智能等新一代信息技术产业的蓬勃发展，服务器电源的高效率和高功率密度要求日益增强。本文详细介绍了基于小华 HC32F334 数字电源控制器的两路交错无桥图腾柱 TCM_PFC 参考设计，重点介绍了工频过零点电流畸变控制、工频过零点附近的逻辑处理、轻载效率和 THD 优化、准确负电流检测与防干扰设计、变频交错功能的实现、及保护功能设计。