

## 1 介绍

本应用笔记介绍了如何使用MC56F83783实现图腾柱无桥功率因数校正 (PFC)。MC56F83783是基于32位56800EX内核的数字信号控制器 (DSC) 系列的产品。该内核的处理能力与该MCU上提供的外设专为轻松实现高性能电源转换应用而设计。

本文档重点介绍系统说明和软件设计。系统说明部分包括系统结构、控制器的特性、控制逻辑电路、不同的工作模式和控制环路等。软件设计部分主要包括工程文件结构、状态机、控制时序、外设配置与过零PWM的生成等。详细的硬件设计和控制环路设计在文档《基于MC56F82748的图腾柱无桥PFC设计》(文档DRM174) 中进行了描述。

## 2 系统说明

### 2.1 系统结构

该应用是在高压无桥PFC功率模块和MC56F83783控制器卡上开发的。高压功率模块包含整个电源电路、信号调理模块、驱动电路和辅助电源等。辅助电源直接从直流母线取电，然后通过反激式转换器生成所需的电压。感测电路用于感测输入电压、输入电流、直流母线电压，并将它们调整到DSC可接受的电压水平。驱动器用于放大DSC的PWM信号。同步整流器用于取代导通二极管，减少导通损耗。

MC56F83783 DSC控制器放置在控制子卡上，并通过PCI插槽连接到电源板。控制卡由电源板供电，它是整个应用的主设备。

一个隔离的通用异步收发器 (UART) 端口用于与其他设备进行通信，例如后级LLC谐振转换器。另一个UART-USB转换器用于与主PC进行通信，用于FreeMASTER或固件更新，一个IIC为PM总线网络预留。

整体系统结构如图1所示。

### 目录

|                |    |
|----------------|----|
| 1 介绍.....      | 1  |
| 2 系统说明.....    | 1  |
| 3 软件设计.....    | 6  |
| 4 应用设置与控制..... | 12 |
| 5 测试.....      | 13 |



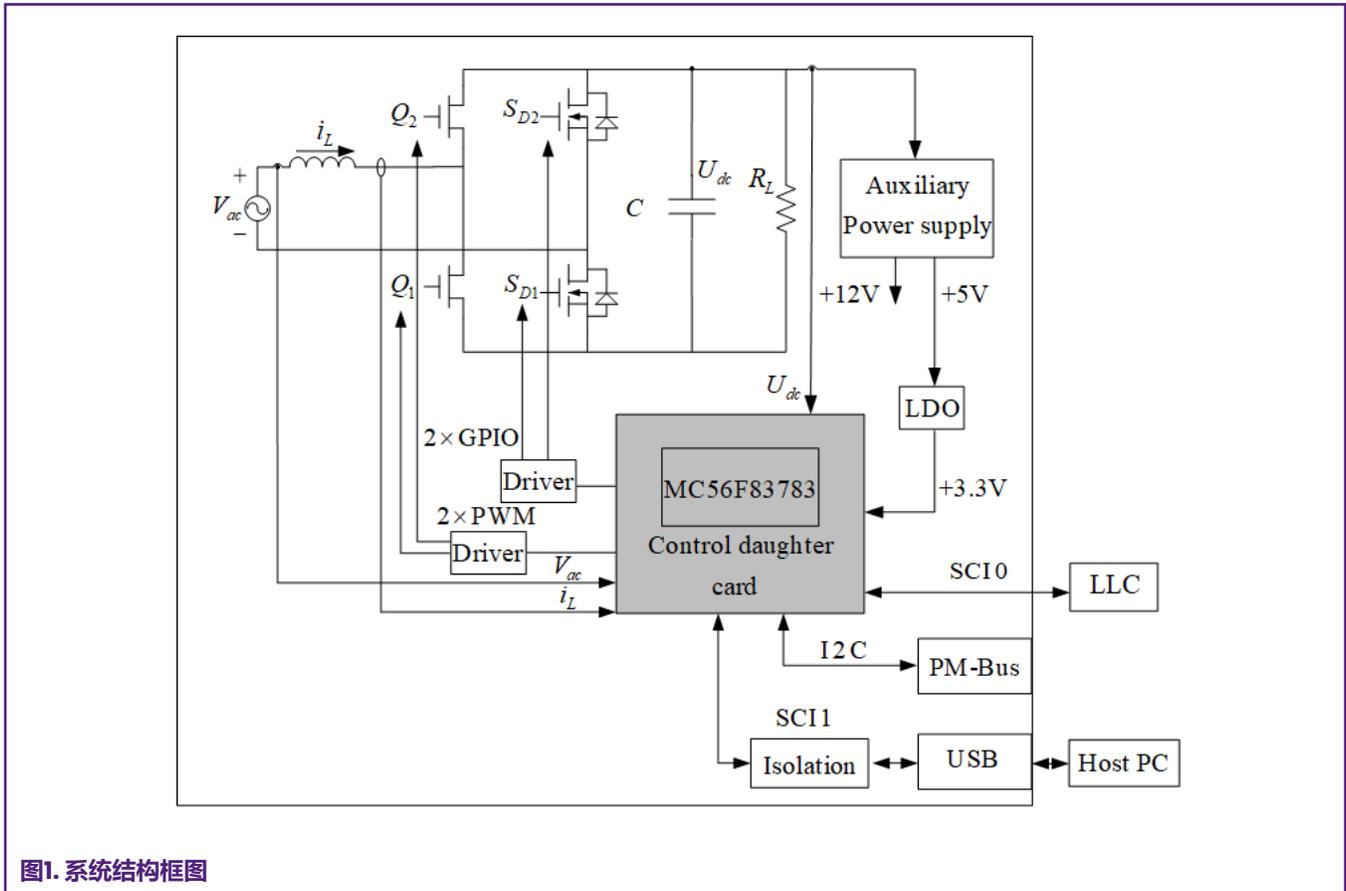


图1. 系统结构框图

## 2.2 控制器的特性

56F837xx微控制器是基于32位56800EX内核的数字信号控制器（DSC）系列的一个产品。该系列的每个产品都在一个芯片上结合了32位DSP的处理能力和微控制器的功能，以及一组灵活的外设。由于其性价比高、配置灵活以及程序代码紧凑，56F837xx适用于多种消费电子和工业应用。

56F837xx具有许多高集成度的外设和强大的处理能力，是一个低成本的产品系列，特别适用于工业控制、运动控制、家用电器、通用逆变器、智能传感器、消防和安保系统、开关电源、电源管理、无线充电、UPS、太阳能逆变器和医疗监测应用。

下面的列表汇总了整个56F837xx系列的特性完整集。

- 32位56800EX DSC内核。
- 高达100 MHz的运行频率。
- 两个128 KB具有ECC保护和分区交换功能的程序Flash存储区，64KB的双端口程序/数据RAM，32KB的BootROM。
- 可保护监督程序和资源不受用户程序的影响。
- 两个8通道的eFlexPWM模块，带NanoEdge™配置和增强捕获功能。
- 两个8通道的12位循环模数转换器（ADC）。
- 一个4通道的eDMA。
- 一个带窗口功能的看门狗定时器，电源监控器。
- 片上48MHz/200kHz弛张振荡器和4MHz-16MHz晶振（XOSC）。

- 模块间交叉开关和事件发生器 (EVTG) 执行布尔逻辑, 含翻转器。
- 可编程的中断控制器 (INTC)。
- 两个四路定时器, 两个周期间隔定时器。
- 两个12位数模转换器 (DAC) 模块。
- 四个高速比较器, 集成了8位DAC参考信号。
- 5V兼容I/O (RESETB引脚除外, 其为3.3V引脚)。

灵活的eFlexPWM模块、快速ADC模块、片上模拟比较器模块、模块间交叉开关和EVTG使开关电源应用大受裨益。

该PWM模块配置灵活, 能够生成各种切换模式, 包括高复杂度的波形。它可用于控制所有已知类型的电机, 也非常适合控制不同的SMPS拓扑结构, 其特性如下所示:

- 16位分辨率, 适用于中心、边缘对齐和非对称PWM。
- 分数延迟可提高PWM周期和边缘放置的分辨率, 可高达312.5ps。
- 可以作为互补对或独立通道运行的PWM输出。
- 每个PWM周期可以产生六个同步事件, 并通过硬件输出。
- PWM输出和触发事件均可通过XBAR引脚输出。
- 支持与外部硬件或其他PWM同步, 半周期重加载功能。
- 触发频率可以控制, 以与重加载频率一致。
- 带有可编程滤波器的故障输入, 可以分配用于控制多个PWM输出。
- 独立可编程的PWM输出极性, 顶部和底部死区插入。
- 每个互补对可以使用其自己的PWM频率和死区值运行。
- 所有输出都可以进行编程, 通过FORCE\_OUT事件同时发生变化。

两个12位分辨率的独立模数转换器执行ADC功能, 每个转换器有8个模拟输入和自己的采样保持电路。一个通用数字控制模块配置和控制转换器的运行。ADC的特性包括:

- 两个独立的12位ADC:
  - 两个8通道外部输入。
  - 内置x1、x2、x4可编程增益前置放大器。
  - 最大ADC时钟频率高达25MHz, 周期低至40ns。
  - 单次转换时间为10个ADC时钟周期。
  - 额外转换时间为8个ADC时钟周期。
- 支持单端和差分转换的模拟输入。
- 顺序、并行和独立扫描模式。
- 所有样本均支持偏移、极限和过零计算。
- ADC转换可以通过连接到内部交叉开关模块的任意模块 (如PWM、定时器、GPIO和比较器模块等) 进行同步。
- 扫描可以暂停, 并等待新的SYNC输入后再继续。
- 扫描结束时的可产生中断。

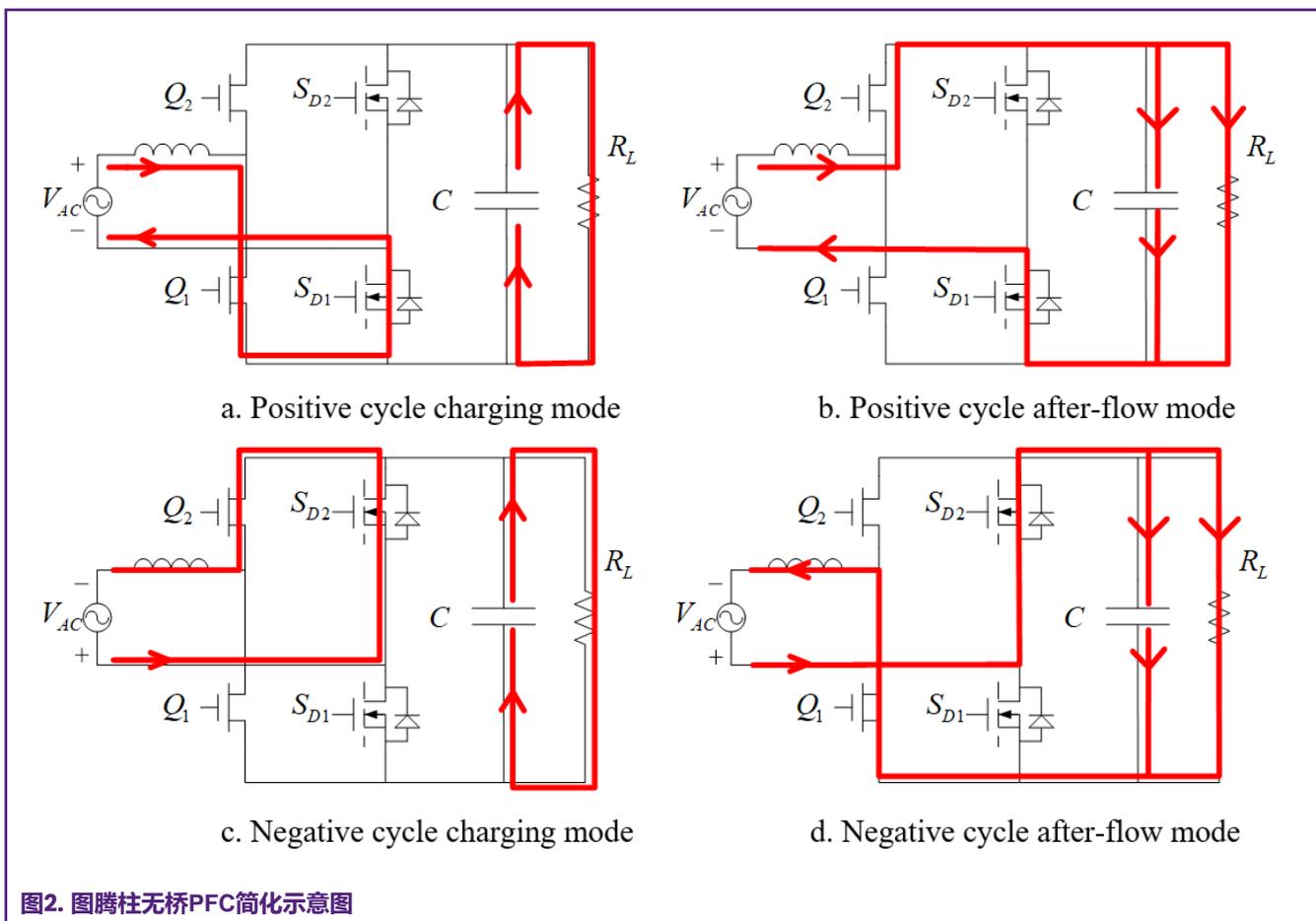
模块间交叉开关实现了一个M N组合的多路复用器阵列。所有复用器共享相同的N个输入, 但每个都有自己独立的选择字段。XBAR的特性如下所示:

- 提供片上外设之间的通用连接：模数转换器（ADC）、12位数模转换器（DAC）、比较器、四路定时器、eFlexPWM、EWM，还可选择输入/输出引脚。
- 对于连接到交叉开关的所有模块，用户可定义输入/输出引脚。
- 可由交叉开关生成DMA请求和中断。
- 寄存器写保护。

EVTG模块具有以下特性：

- 高度可编程模块，用于创建组合布尔事件。
- 每个EVTG有四个输入和两个输出，两个AOI。
- 一个灵活的FF可以配置为RS、D-FF、T-FF、JK-FF、锁存器或旁路。
- 可编程滤波器，用于消除输入干扰。
- 所有逻辑在总线时钟域是同步的。

## 2.3 控制逻辑电路



图腾柱无桥PFC由一对以PWM频率运行的GaN HEMT开关（Q1与Q2）组成。它们在半周期内作为一对升压转换器工作。在任一周期中，一个GaN HEMT将作为主开关增加升压电感L的电流，另一个晶体管将作为从开关强制电流流向直流输出，同时释放能量。当交流极性改变时，这对开关的角色互换。两个硅MOSFET开关（SD1与SD2）在输入电压频率上运行。此外，增加了死区时间，以避免GaN和硅MOSFET桥直通短路。

## 2.4 工作模式

由于转换器是非线性的，特别是对于GaN同步整流，定频控制器很难在轻载时在DCM下确保良好的输入电流形状。DCM中输入电流形状不佳将导致高电流失真和大RMS电流消耗，从而导致功率因数不佳。此外，在轻载时，由栅极电荷损耗、MOSFET中的寄生电容损耗和电感中的磁芯损耗组成的与负载无关的恒定损耗占主导地位，导致效率极低。

在这个应用中，控制电路通过接通和断开PFC，在滞后带宽内调节输出电压，以确保高效率。

当负载非常轻时，PFC将被关闭。在该应用中，当输入电流参考值为0.25A（即电流参考的下限）达一定时间，PFC将进入突发模式，如图3所示。PFC关闭，输出电压下降。当输出电压达到 $V_{DC\_BURSTOFF}$ 时，PFC将再次以恒定参考电流0.25A开启。如果输出电压迅速降至较低阈值，PFC将再次回到正常模式。

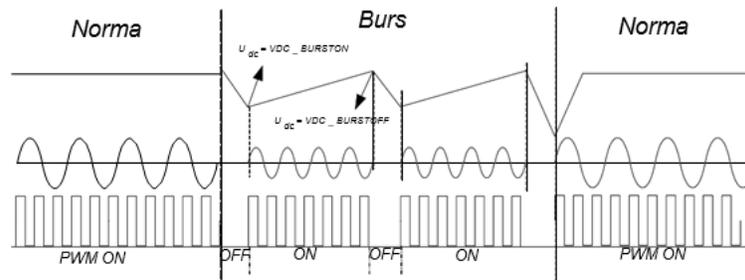


图3. 正常模式与突发模式示意图

## 2.5 控制环路

功率因数（PF）的定义为交流输入的有功功率与视在功率之比。假设输入电压是一个完美的正弦波，PF可以定义为电流失真与相移的乘积。基于MC56F83783，实现了如图4所示的数字PFC整流器。PFC控制环路的任务如下：

- **控制电感电流：**使电流成正弦波形，并维持与输入电压相同的相位。
- **控制输出电压：**使输出电压等于目标值。

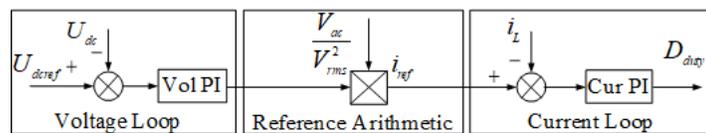


图4. 图腾柱无桥PFC控制方案

根据PFC理论，PFC算法可以分为三部分：

- **电压外环：**确保输出电压追随参考值-恒定电压输出。
- **参考算法：**确保电流参考值追随正弦参考值。
- **电流内环：**确保输入电流追随给定的电流参考值。

在模拟运算中，输入电压采样值被引入，作为输入电流的参考值，因此纹波电压同时被引入到电流控制中。在该应用中，使用输入电压前馈：

$$\text{Eqn. 1} \quad i_{ref} = \frac{V_{dc} V_c}{V_{rms}^2}$$

其中：

- $V_{ac}$ ：确保电流波形跟随输入电压波形的输入电压。
- $V_c$ ：稳压器的输出。
- $V_{rms}$ ：输入电压的RMS值。

## 3 软件设计

本章介绍了使用56F83783实现图腾柱无桥PFC的软件设计，包括软件结构、状态机、DSC外设配置、控制时序和PWM生成机制。

该软件使用Code Warrior 11.1以C语言编写，并调用了嵌入式软件库（FSLESL）以节省时间。有关如何在Code Warrior工程中使用这些库的更多信息，请参阅《将DSC Freescale嵌入式软件库集成到Code Warrior 10.2》（文档AN4586）。

### 3.1 工程文件结构

该工程基于CodeWarrior 11.1生成的Bareboard工程构建，无配置工具，如Processor Expert和Quick Start。整个工程文件结构如图5所示。

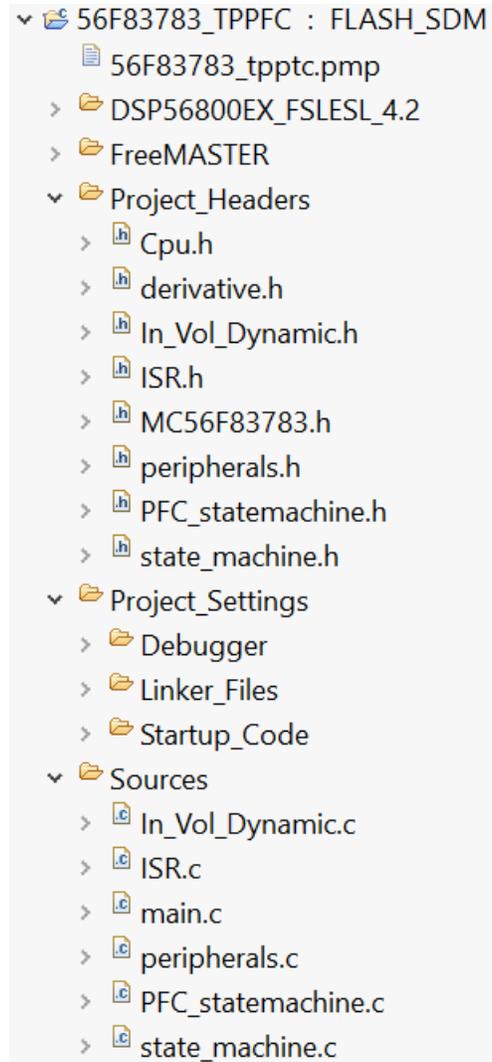


图5. 工程文件结构

新增和需要修改的文件如下：

1. ..\DSP56800EX\_FSLESL\_4.2: FSLESL库。
2. ..\FreeMASTER: FreeMASTERdrive和配置文件，在freemaster\_cfggen.h中更改FreeMASTER配置。
3. ..\Project\_Settings\Linker\_Files\Mc56F83783\_Internal\_PFlash\_SDM.cmd: 工程链接文件。
4. ..\Sources\Main.c: 主C源文件。
5. ..\Sources\ISR.c: 应用中断例程C源文件。
6. ..\Sources\Peripheral.c: 应用外设初始化C源文件。
7. ..\Sources\state\_machine.c: 通用状态机C源文件。
8. ..\Sources\PFC\_statemachine.c: PCF状态函数C源文件。
9. ..\Sources\In\_Vol\_Dynamic.c: 特定控制函数C源文件，如交流压降检测。
10. ..\Project\_Headers\ISR.h: 中断向量头文件。
11. ..\Project\_Headers\peripheral.h: 应用外设配置头文件。

12. ..\Project\_Headers\statemachine.h: 通用状态机头文件。
13. ..\Project\_Headers\PFC\_statemachine.h: 应用定义头文件。
14. ..\Project\_Headers\In\_Vol\_Dynamic.h: 特定控制函数头文件。

## 3.2 参数归一化

为了充分利用DSC资源，与应用相关的物理量都归一化为定点十进制格式，即Q数据格式。

物理量的实际值与其归一化值之间的关系如下所示。

$$\text{Eqn.2 } \text{Fracvalue} = \frac{\text{actualvalue}}{\text{quantizationrange}}$$

其中：

- *Frac value* (分数值)：物理量的归一化值。
- *Actual value* (实际值)：以单位表示的物理量的实际值。
- *Quantization range* (量化范围)：该物理量的最大可测量值。

## 3.3 状态机

该应用使用状态机来控制系统流程，如图6所示。当DSC复位并配置了所有外设后，系统进入一个包括应用状态机在内的无休止循环。应用状态机共有四个状态：

- **INIT (初始化)**：变量初始化。
- **STOP (停止)**：系统已初始化，检查启动条件，PWM输出被禁止。
- **RUN (运行)**：系统正在运行，run sub-state被调用，PWM输出根据负载被启用或禁止，可以通过**STOP**命令停止。
- **FAULT (故障)**：系统面临故障，PWM输出被禁止。

在参数初始化后，应用状态机接着进入**STOP (停止)**状态。

软件会定期检查PFC\_run指令，以决定是否启动。当设置了PFC\_run命令时，检测输入电压RMS，确定其是否满足要求。如果满足要求，在继电器闭合的情况下，输出电压达到稳定值后，应用状态机接着进入**RUN (运行)**状态。在**RUN (运行)**状态下，控制器开始生效，根据负载实现给定的输出电压和电流。此外，PFC\_run指令也会在**RUN (运行)**状态下定期检查。当PFC\_run命令被清除时，应用状态机返回**STOP (停止)**状态，并等待PFC\_run命令再次设置。

在每个状态下，如果检测到任何故障，应用状态机会进入**FAULT (故障)**状态。在**FAULT (故障)**状态下，故障检测仍然执行，可以选择是否重新启动应用。如果允许，在故障情况完全被清除后，应用状态机将从**INIT (初始化)**状态重新启动。如果不允许，软件将停留在一个无休止的循环中，转换器的输出将被禁止。系统需要再次上电才能重启。

**RUN (运行)**状态根据PFC应用分为三个子状态，如图6所示。当应用状态机从**STOP (停止)**转换到**RUN (运行)**时，系统首先进入软启动子状态。母线电压参考将以一个固定斜率平稳上升。在输出电压或其参考值达到目标后，系统转入**NORMAL (正常)**子状态。在**NORMAL (正常)**子状态下，当负载过轻时，系统将进入**LIGHTLOAD (轻载)**子状态。反之，当负载增加并使输出电压低于突发下限时，系统将从**LIGHTLOAD (轻载)**转回**NORMAL (正常)**子状态。子状态函数和相应的转换函数在PFC\_statemachine.c中定义，并在系统处于**RUN (运行)**状态时被调用。

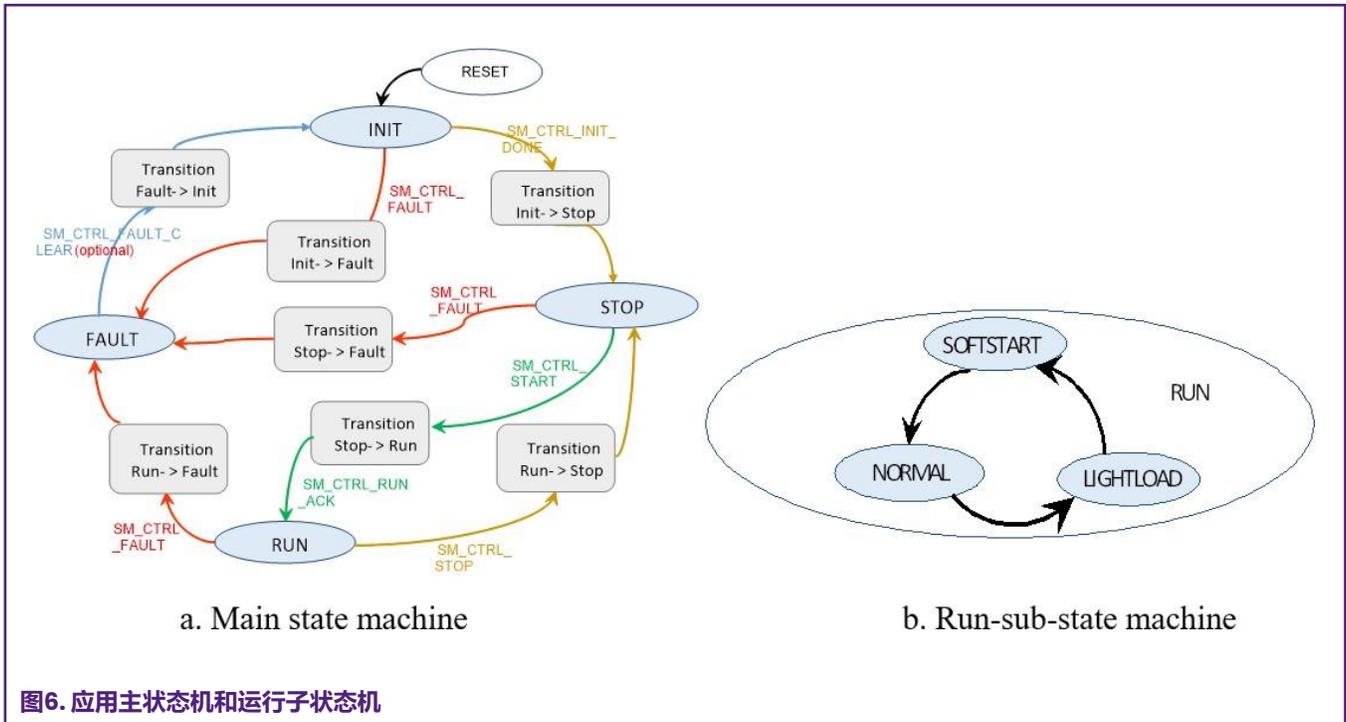


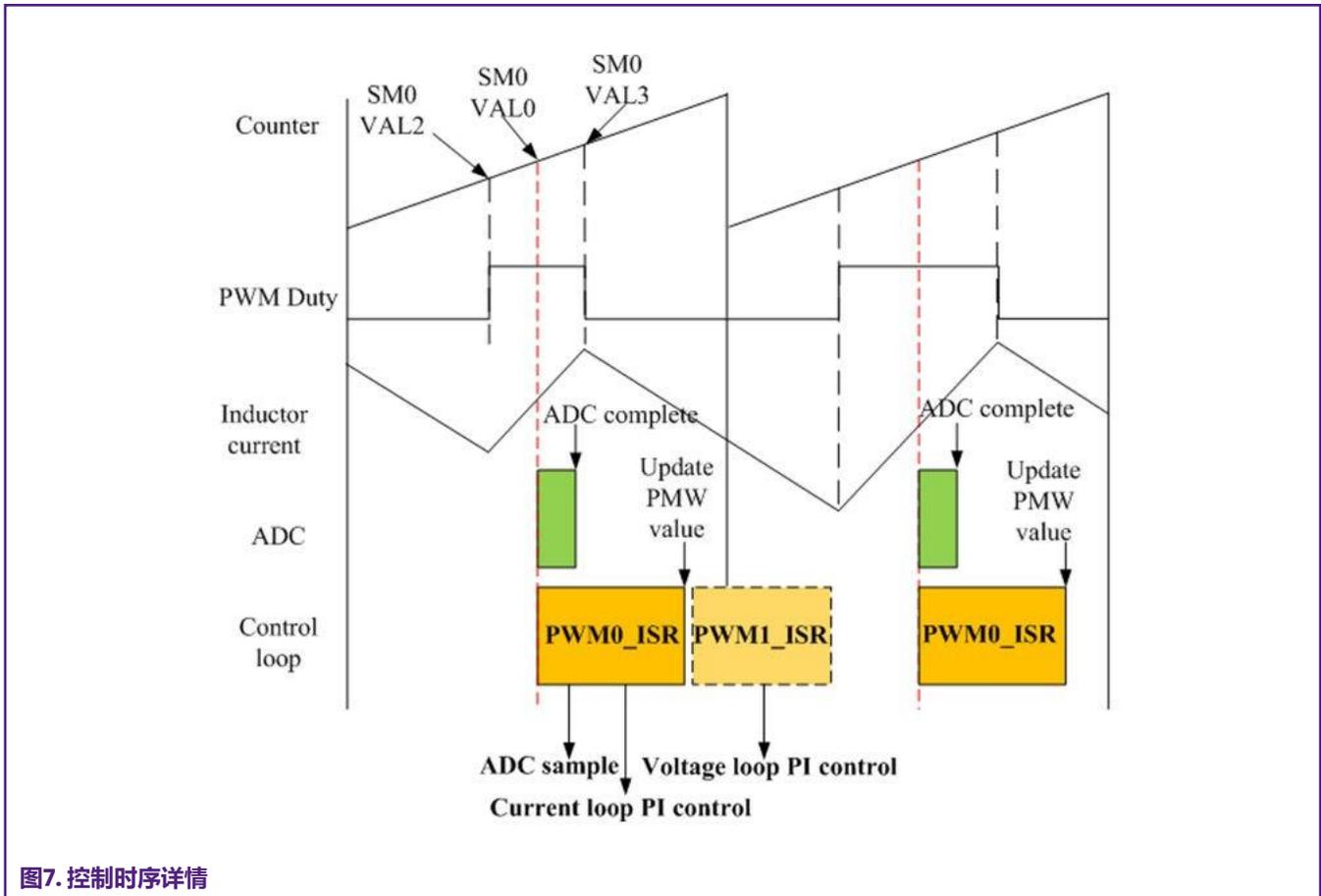
图6. 应用主状态机和运行子状态机

### 3.4 控制时序

PFC软件由两个周期性中断和一个后台环路组成。第一个周期性中断 $PWM0\_ISR()$ 由eFlexPWMA SM0的VAL0比较事件驱动。该例程被配置了高优先级，以80kHz的频率执行内部电流环路计算并获得所需的交换信号。另一个周期性中断 $PWM1\_ISR()$ 由eFlexPWMA SMI的VAL0比较事件驱动。该例程的优先级较低，以10kHz的频率执行外部电压环路计算，并在检测到过零时计算输入电压和电流的RMS。后台环路在主循环中运行。它包括应用状态机、与PC (FreeMASTER) 和后续LLC的通信。

总而言之， $PWM0\_ISR()$ 是一个时间关键型例程。采用FSLES可最大限度地减少总执行时间。

在这个PFC应用中，PWM输出信号被重新路由到输出触发端口，使其可以通过XBAR和AOI模块发送到芯片路由逻辑，生成最终的驱动信号。MC56F83783的eFlexPWMA模块有四个子模块SM0-3。SM0用于生成高优先级中断服务请求 $PWM0\_ISR()$ ，更新PWM输出占空比并同步ADC采样。SM1用于生成 $PWM1\_ISR()$ ，执行电压环路计算。SM2用于向ADC A&B采样提供输出触发。ADC触发略微领先于开关中点，以便中心对齐PWM确保ADC采样点位于PWM的中心，不受PWM开关操作的影响，可以在电流上升时获得电感电流的中间值。此外，SM0 VAL0事件和ADC触发的时序使寄存器推送、无需实时采样结果的算法和ADC采样同时进行，为其他算法计算留出更多的时间。



### 3.5 故障保护

硬件保护包括电感电流过流保护、输出电压过压保护。过流保护由内置的高速比较器CMPB和CMPC产生，用于正极和负极。过压保护由比较器D产生。

软件保护包括电感过流保护、输出欠压和过压保护，以及输入电压欠压和过压保护。

### 3.6 外设配置

该应用使用专用外设来实现PFC算法和通信。使用的外设有：ADC、eFlexPWM、XBAR、EVTG、CMP、SCI和GPIO。其他未使用的外设被禁用且不上电。

#### 3.6.1 ADC转换器

ADC的A和B转换器被设置为同时运行，并由eFlexPWM子模块2的VAL0比较事件触发。eFlexPWM和ADC之间的触发信号连接由交叉开关模块提供。ADC A采样输入电压和输出直流母线电压，ADC B采样输入电流。

#### 3.6.2 功率宽度调制器eFlexPWM

eFlexPWMA子模块0产生两个具有80kHz恒定频率和可变占空比的互补PWM信号。生成的PWM信号被路由到XBAR。VAL0比较事件用于生成中断例程PWM0\_ISR()来处理内部电流环路算法。为了最大化算法执行时间，VAL0设置为开关中点之前的35个总线周期。

eFlexPWMA的子模块1和2用于时序控制，不会产生PWM信号。子模块1用于生成10kHz中断例程Pwm1\_ISR()，以处理外部电压环路算法。子模块2用于生成ADC的触发信号。为了获得准确的平均输入电流，ADC触发信号设置为开关中点前20个总线周期。由于子模块2通过主重载强制初始化与子模块0同步，ADC触发信号几乎与Pwm0\_ISR()触发同步。

### 3.6.3 高速比较器HSCMP

- **HSCMPB和C**：内置高速比较器B和C用于检测输入电流两侧的过流情况。这两个比较器的一个输入是单侧测量的电感电流，另一个是由内置8位DACB和C设置的故障阈值。
- **HSCMPD**：内置高速比较器D用于检测输出电压的过压情况。此比较器的一个输入是测量的输出电压，另一个是由内置8位DACD设置的故障阈值。

### 3.6.4 外设间交叉开关XBAR

XBAR提供从任何输入到任何输出的灵活连接，具体由用户控制。应用配置如下：

- 通道29，PWMA故障0：来自XBARIN13和CMPB\_OUT
- 通道30，PWMA故障1：来自XBARIN14和CMPC\_OUT
- 通道31，PWMA故障2：来自XBARIN15和CMPD\_OUT
- 通道12，ADC触发：来自XBARIN24和PWMA\_trigger0

### 3.6.5 事件发生器EVTG

每个EVTG包含两个共享4个关联输入的AOI模块。XBAR开关通常用于从可用的外设输出和GPIO信号中选择EVTG的输入。驱动信号可以直接输出，或连接到内部外设的交叉开关（XBAR）。

### 3.6.6 串行通信接口SCI0与SCI1

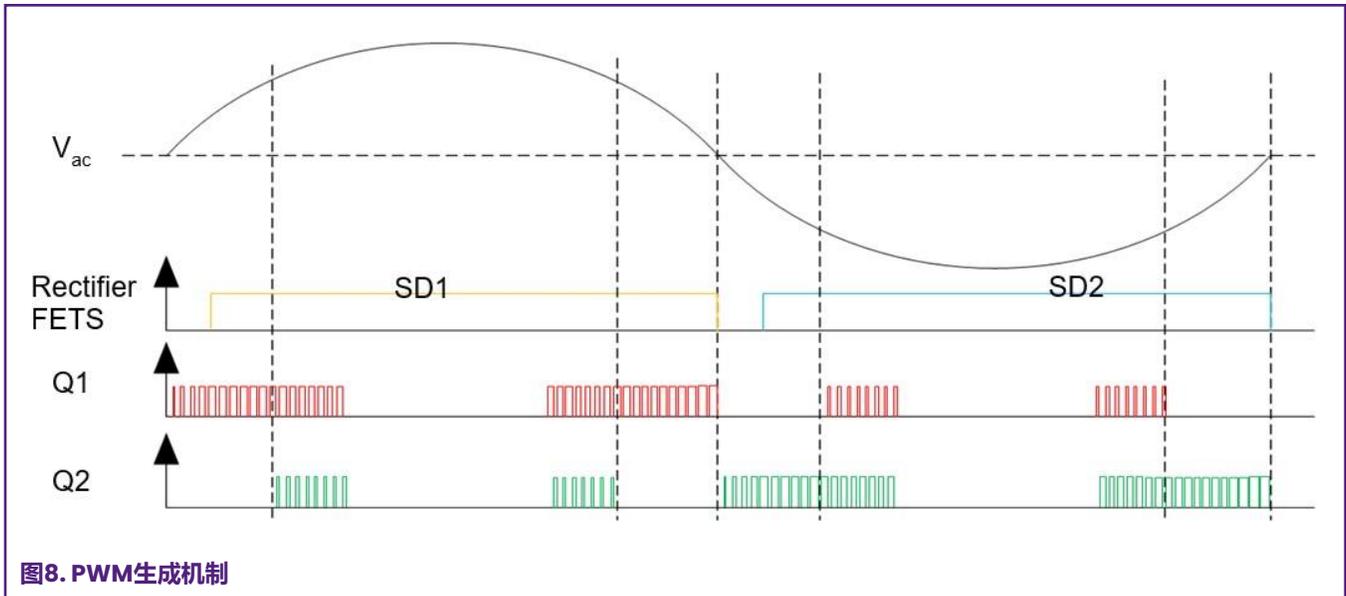
串行通信接口SCI0用于与后级LLC通信，可以交换信息，接受控制指令并执行。

串行通信接口SCI1用于与主PC进行FreeMASTER或固件更新通信。电路板上还有一个SCI -> USB转换器，因此与主PC的通信最终通过USB接口进行。

## 3.7 过零PWM的生成

在无桥图腾柱PFC中，为了避免两侧在过零点出现电流脉冲，需要特定的PWM生成机制。图8所示为此应用的PWM生成机制。

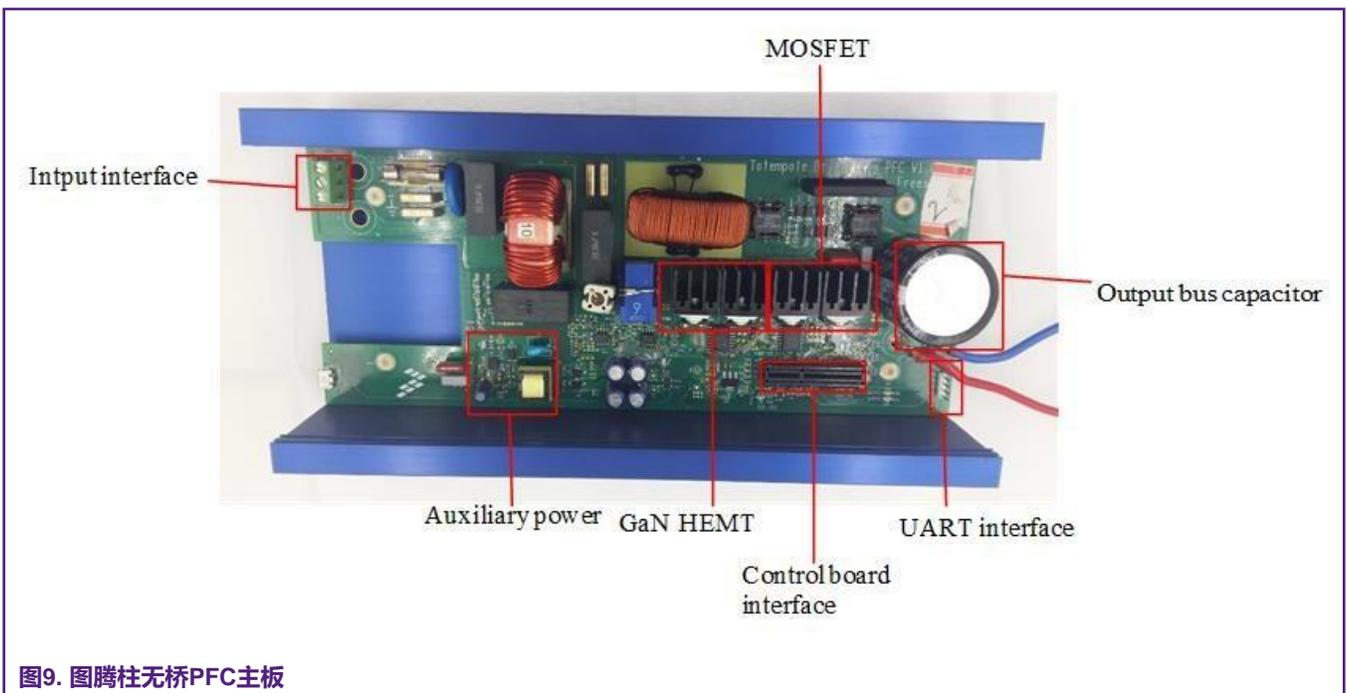
- 有源GaN以较小的占空比开始，并在检测到过零后逐渐增加到控制环路确定的值。
- 整流器FET在过零后延迟一段时间，然后再打开。
- 同步GaN被启用，直到电流增加到阈值。



## 4 应用设置与控制

### 4.1 硬件设置

TP-PFC主板如图9所示。控制板接口用于连接控制板，输入接口用于AC输入连接，UART接口用于与其他电路板进行通信。



要将程序下载到控制芯片，需要用14脚的电缆将调试器（P&E-Multilink）连接到控制板的SWD端口。控制板可以通过主板或控制板中的微型USB接口供电。为了控制和监测PFC系统的工作状态，必须通过微型USB电缆将控制板上的隔离USB接口连接到PC。

**注意**

控制板中的微型接口必须连接到PC，以进行FreeMASTER控制。图腾柱无桥PFC**不得**带载启动，以免损坏启动电阻。

## 4.2 应用控制

该应用可以使用FreeMASTER通过计算机远程控制。控制电路板上用于通信的USB接口已经进行了电隔离，无需额外隔离。

打开位于工程文件夹中的FreeMASTER工程文件56F83783\_tppfc.pmp。工程打开后，按下主菜单中的**停止 (Stop)** 按钮开始通信。通过改变iPFC\_Run来控制应用的开/关。

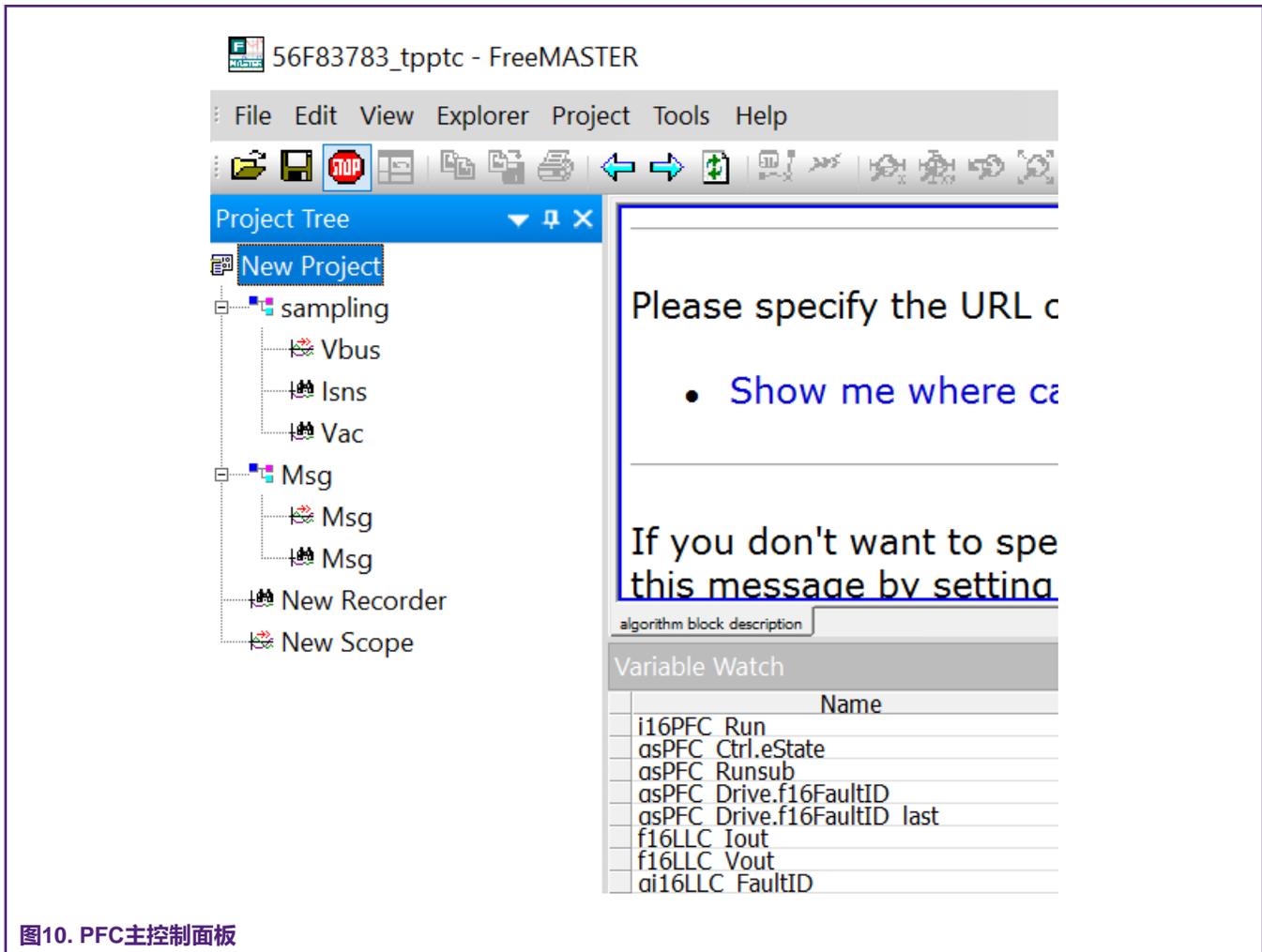


图10. PFC主控制面板

## 5 测试

本节提供了图腾柱无桥PFC的测试结果。

### 5.1 系统效率

表1和表2列出了不同电压下的系统效率。

表1. VIN=110V RMS时的系统效率

| Vin(V) | Iin(A) | Pin(W) | PF     | THDi  | Vout(V) | Iout(A) | Pout(W)  | 效率     |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|----------|--------|
| 109.55 | 1.7658 | 193.12 | 0.9983 | 3.25% | 381.6   | 0.484   | 184.6944 | 95.64% |
| 109.08 | 3.5062 | 382.35 | 0.9997 | 1.98% | 381.8   | 0.961   | 366.9098 | 95.96% |

表2. VIN=220V RMS时的系统效率

| Vin(V) | Iin(A) | Pin(W) | PF     | THDi  | Vout(V) | Iout(A) | Pout(W)  | 效率     |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|----------|--------|
| 220.04 | 0.8775 | 190.23 | 0.9851 | 6.73% | 381.5   | 0.484   | 184.646  | 97.07% |
| 219.77 | 1.7149 | 374.92 | 0.9947 | 4.98% | 381.6   | 0.961   | 366.7176 | 97.81% |
| 219.51 | 2.5574 | 559.62 | 0.9968 | 2.76% | 381.8   | 1.436   | 548.2648 | 97.97% |
| 219.37 | 2.9737 | 651.05 | 0.9979 | 2.50% | 381     | 1.677   | 638.937  | 98.14% |

图11所示为系统效率功率因数曲线。

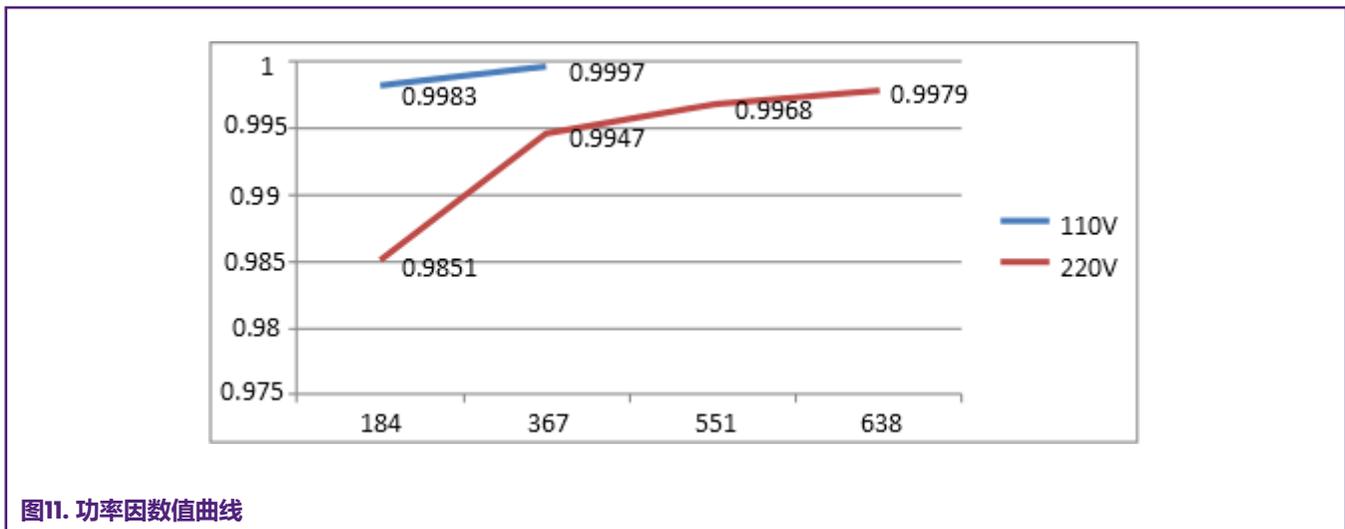


图11. 功率因数曲线

图12所示为总谐波失真值曲线。

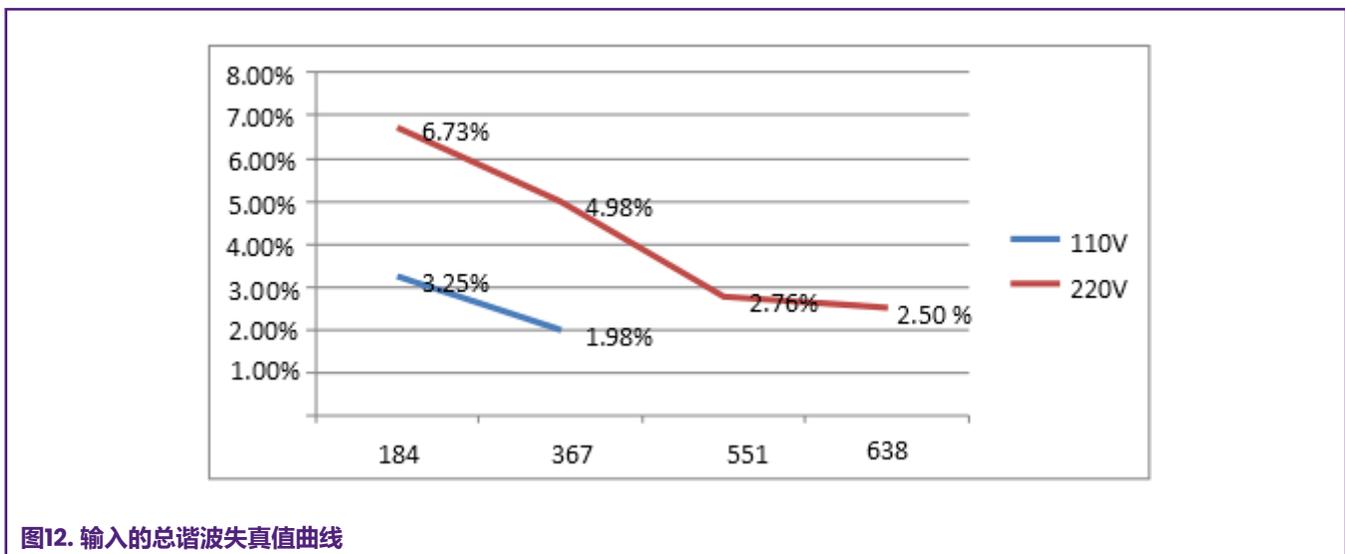


图12. 输入的总谐波失真值曲线

图13所示为效率曲线。

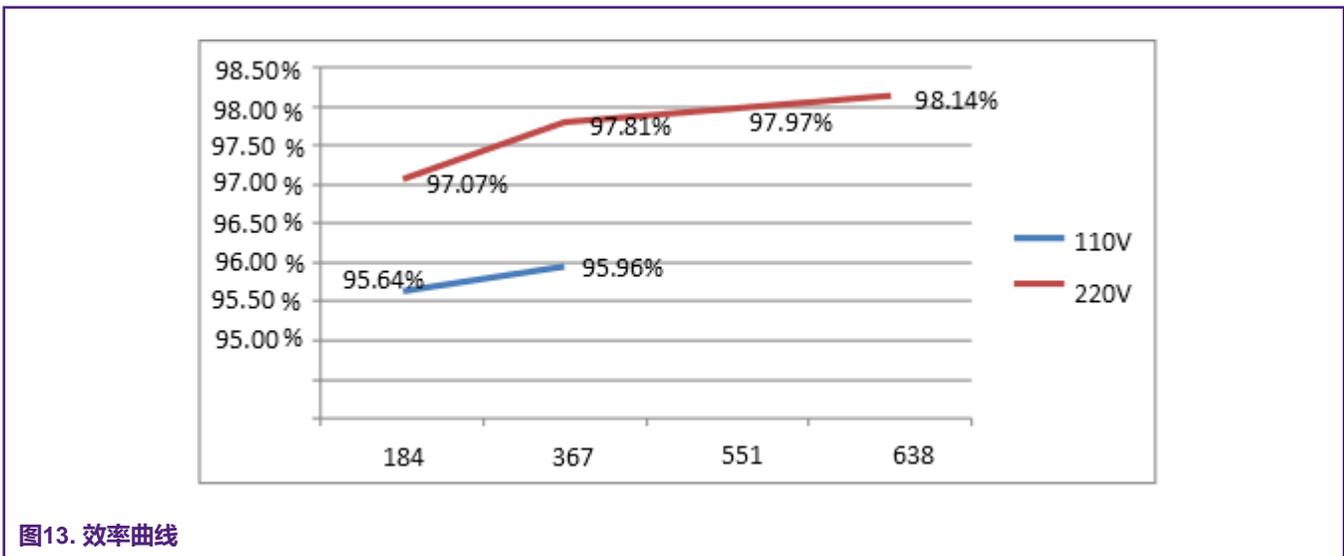


图13. 效率曲线

## 5.2 启动性能

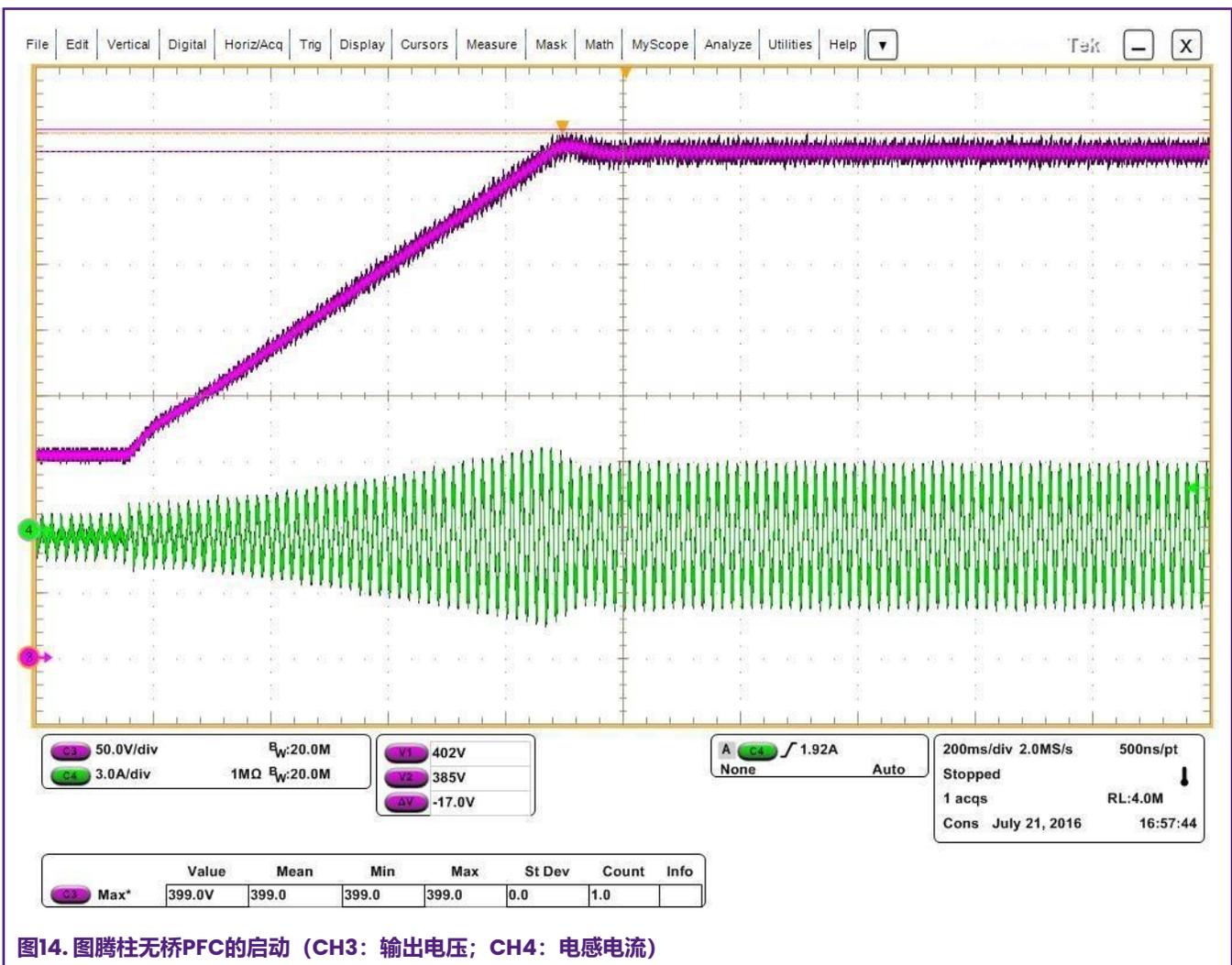


图14. 图腾柱无桥PFC的启动 (CH3: 输出电压; CH4: 电感电流)

### 5.3 稳态性能

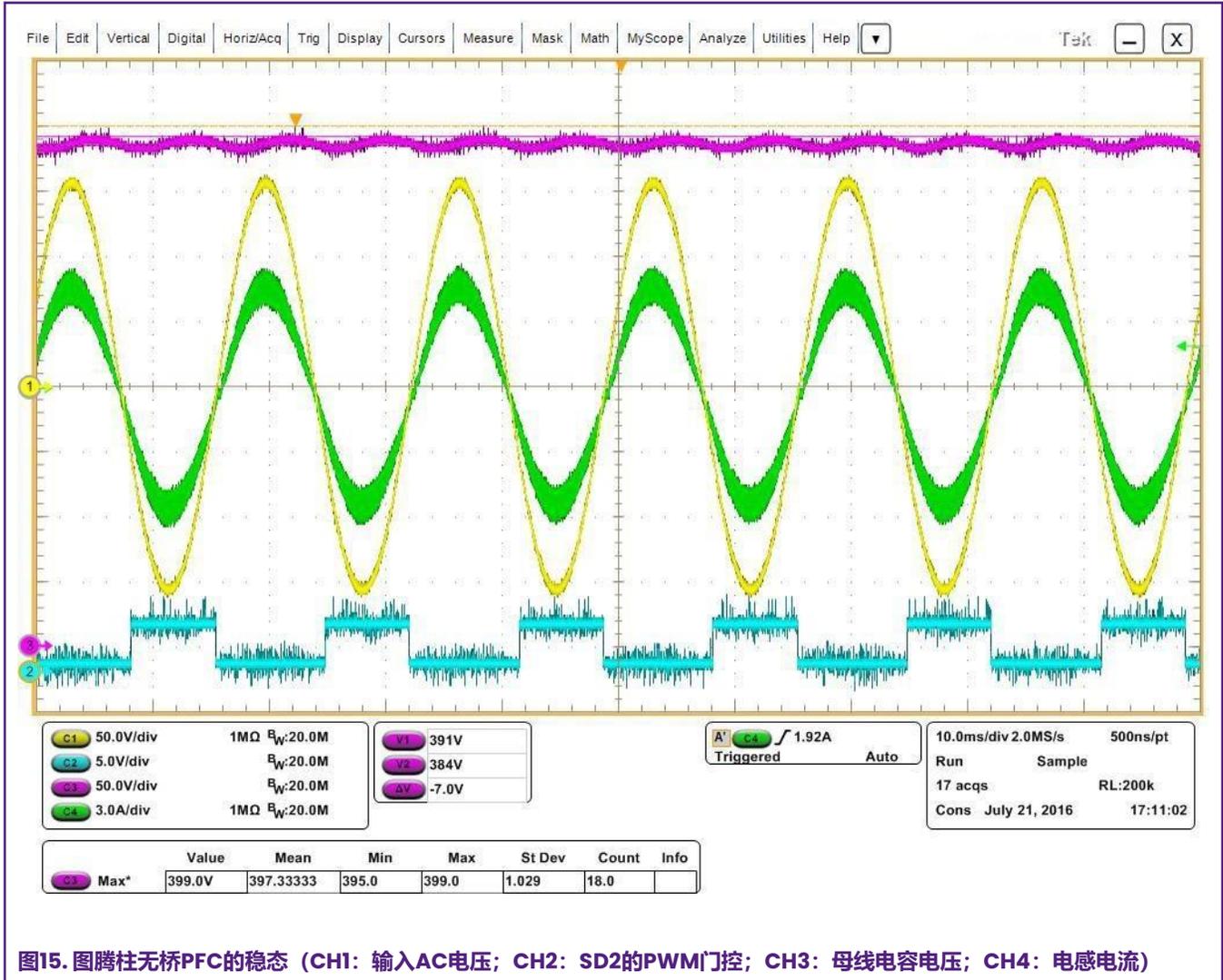


图15. 图腾柱无桥PFC的稳态 (CH1: 输入AC电压; CH2: SD2的PWM门控; CH3: 母线电容电压; CH4: 电感电流)

### 5.4 动态性能

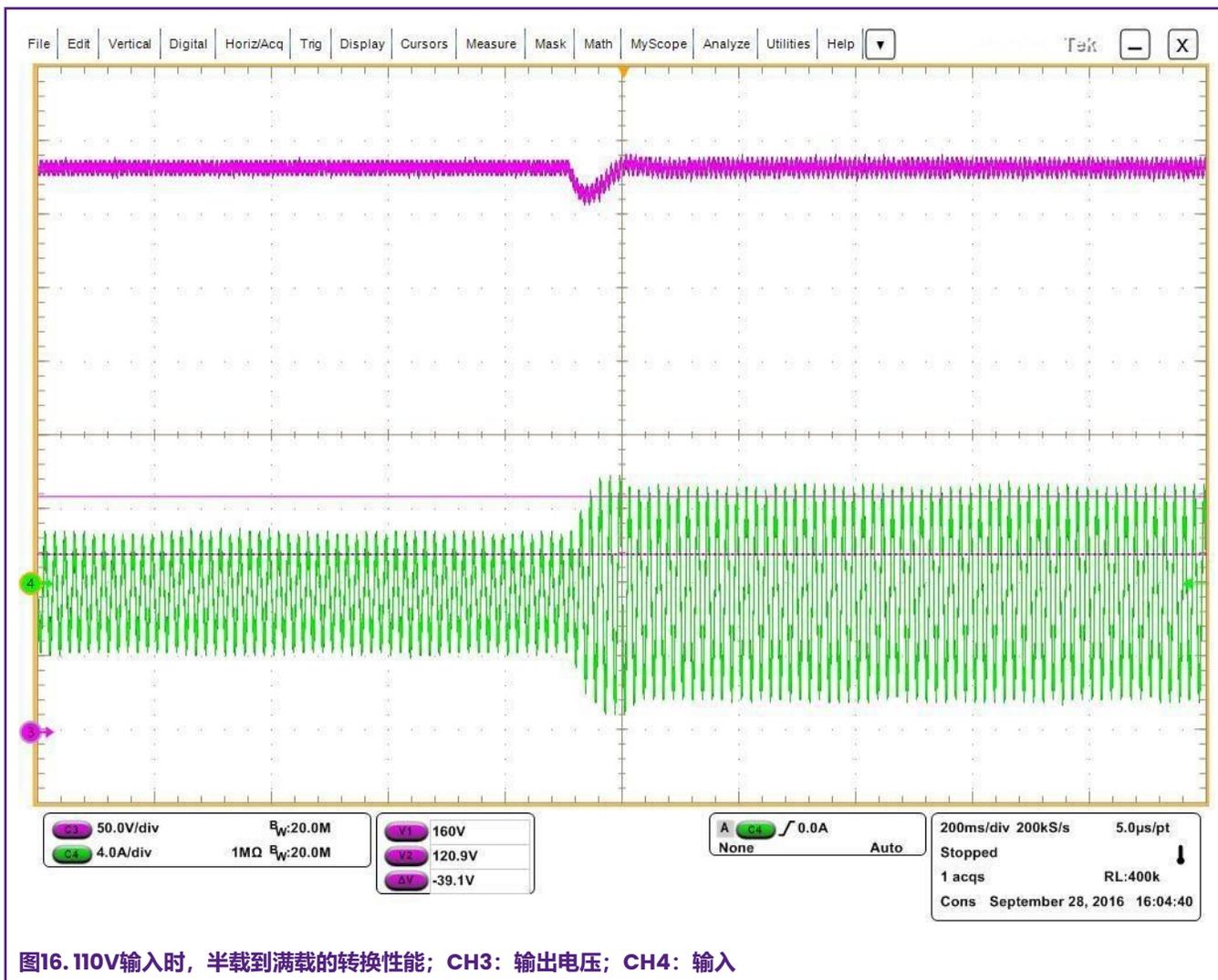
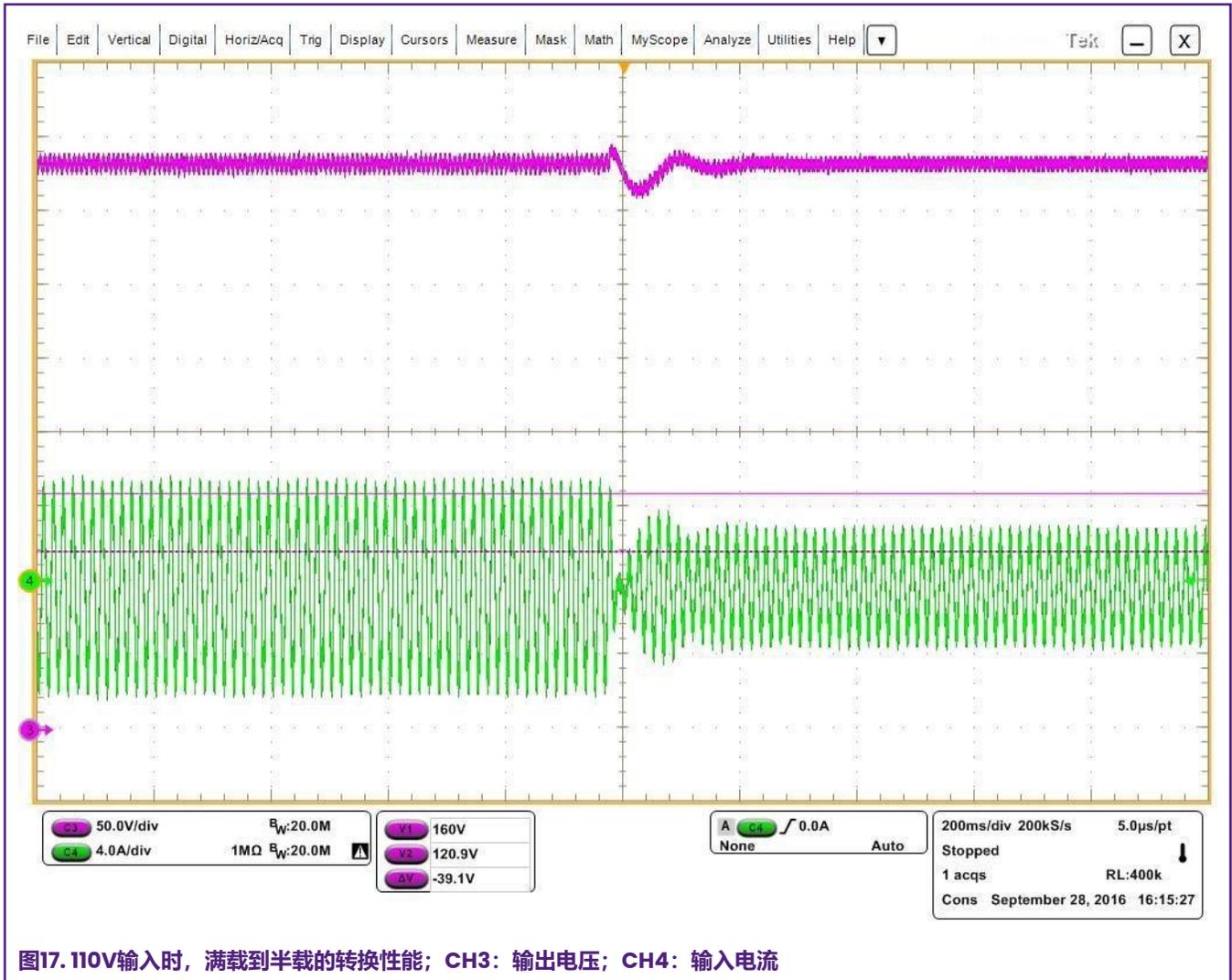


图16. 110V输入时，半载到满载的转换性能；CH3：输出电压；CH4：输入



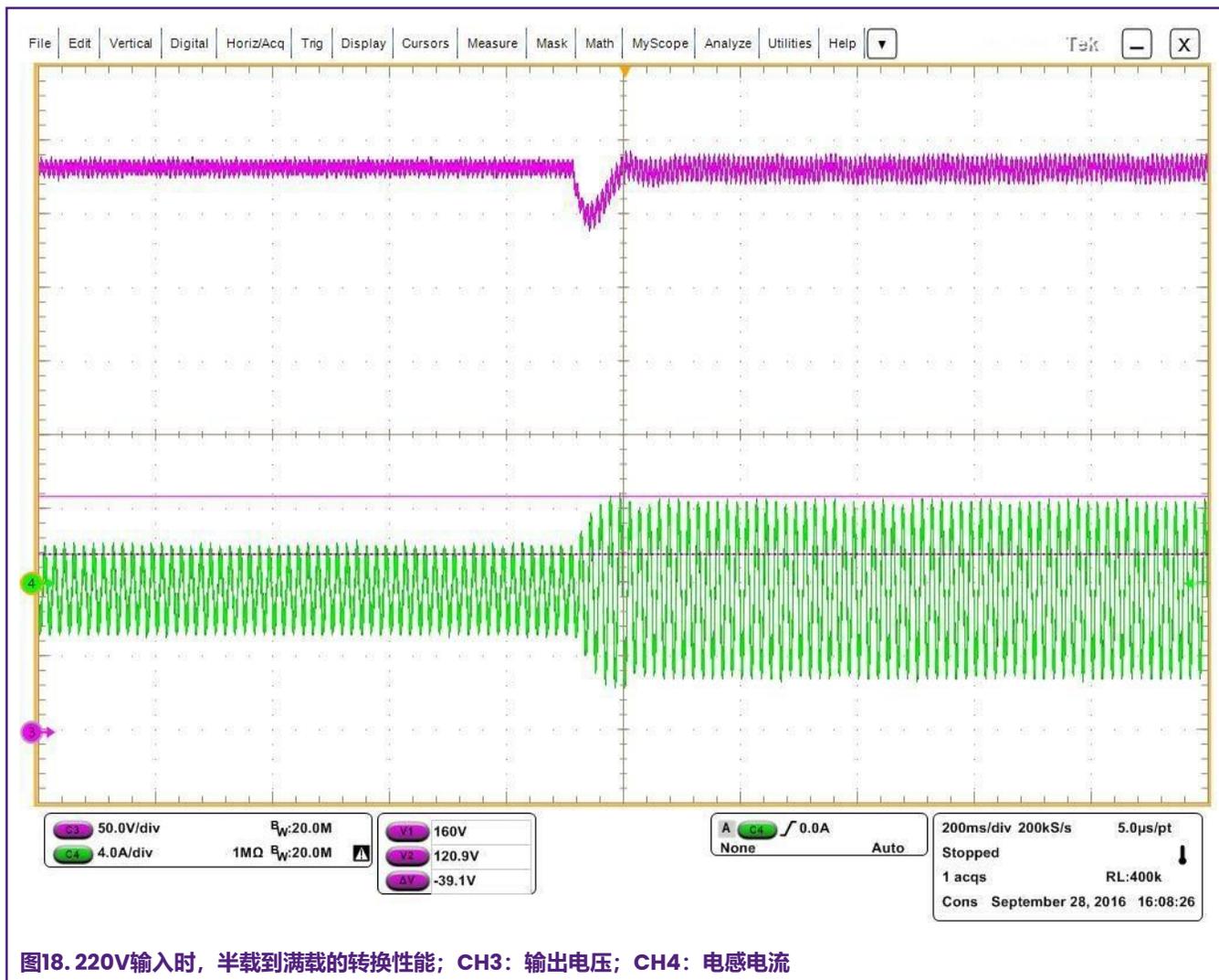


图18. 220V输入时，半载到满载的转换性能；CH3：输出电压；CH4：电感电流

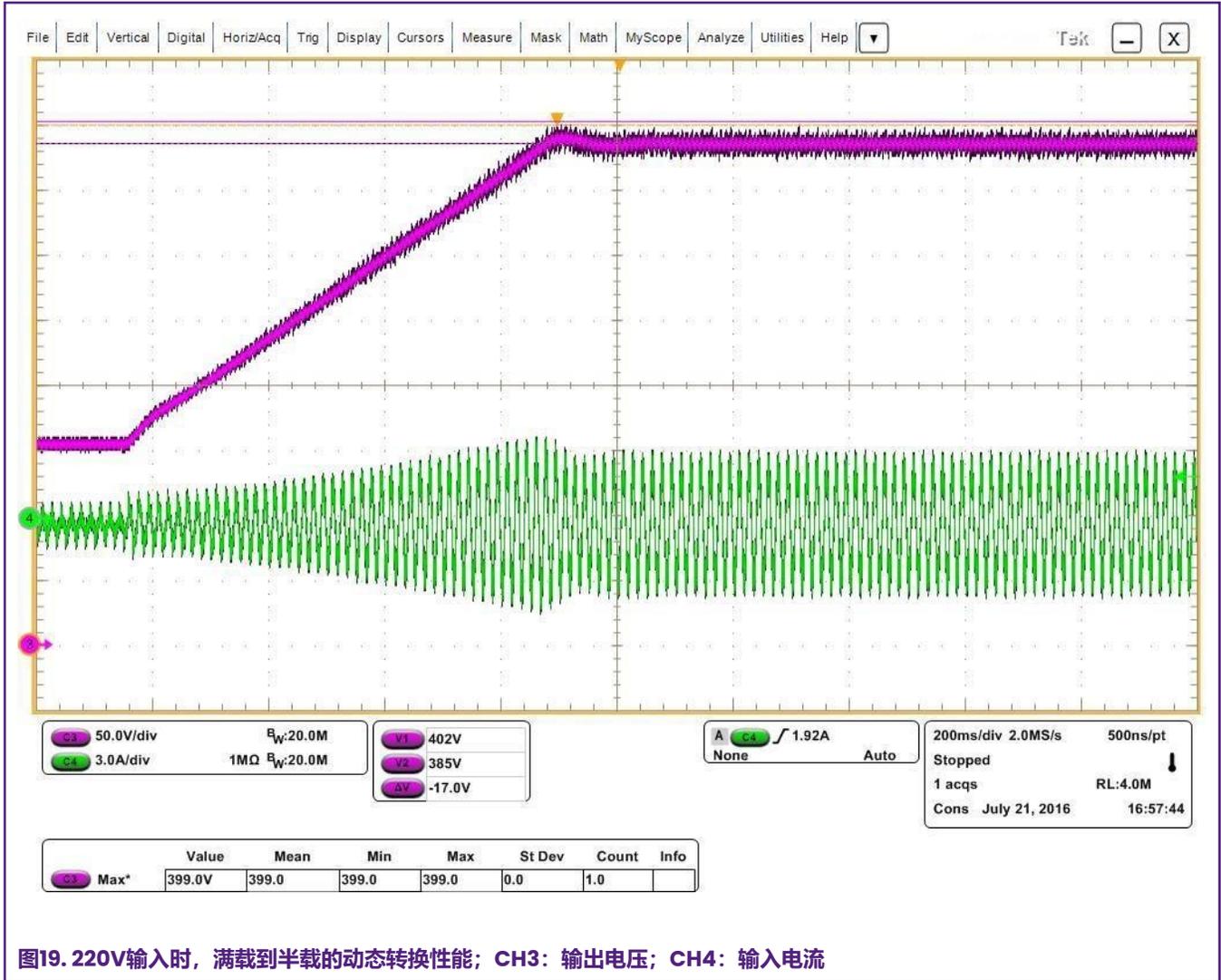


图19. 220V输入时，满载到半载的动态转换性能；CH3：输出电压；CH4：输入电流

### **How To Reach Us**

#### **Home Page:**

[nxp.com.cn](http://nxp.com.cn)

#### **Web Support:**

[nxp.com.cn/support](http://nxp.com.cn/support)

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use NXP products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits based on the information in this document. NXP reserves the right to make changes without further notice to any products herein.

NXP makes no warranty, representation, or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does NXP assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in NXP data sheets and/or specifications can and do vary in different applications, and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "typicals," must be validated for each customer application by customer's technical experts. NXP does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. NXP sells products pursuant to standard terms and conditions of sale, which can be found at the following address: [nxp.com.cn/SalesTermsandConditions](http://nxp.com.cn/SalesTermsandConditions).

While NXP has implemented advanced security features, all products may be subject to unidentified vulnerabilities. Customers are responsible for the design and operation of their applications and products to reduce the effect of these vulnerabilities on customer's applications and products, and NXP accepts no liability for any vulnerability that is discovered. Customers should implement appropriate design and operating safeguards to minimize the risks associated with their applications and products.

NXP, the NXP logo, NXP SECURE CONNECTIONS FOR A SMARTER WORLD, COOLFLUX, EMBRACE, GREENCHIP, HITAG, I2C BUS, ICODE, JCOP, LIFE VIBES, MIFARE, MIFARE CLASSIC, MIFARE DESFire, MIFARE PLUS, MIFARE FLEX, MANTIS, MIFARE ULTRALIGHT, MIFARE4MOBILE, MIGLO, NTAG, ROADLINK, SMARTLX, SMARTMX, STARPLUG, TOPFET, TRENCHMOS, UCODE, Freescale, the Freescale logo, AltiVec, C-5, CodeTEST, CodeWarrior, ColdFire, ColdFire+, C-Ware, the Energy Efficient Solutions logo, Kinetis, Layerscape, MagniV, mobileGT, PEG, PowerQUICC, Processor Expert, QorIQ, QorIQ Qonverge, Ready Play, SafeAssure, the SafeAssure logo, StarCore, Symphony, VortiQa, Vybrid, Airfast, BeeKit, BeeStack, CoreNet, Flexis, MXC, Platform in a Package, QUICC Engine, SMARTMOS, Tower, TurboLink, and UMEMS are trademarks of NXP B.V. All other product or service names are the property of their respective owners. AMBA, Arm, Arm7, Arm7TDMI, Arm9, Arm11, Artisan, big.LITTLE, Cordio, CoreLink, CoreSight, Cortex, DesignStart, DynamiQ, Jazelle, Keil, Mali, Mbed, Mbed Enabled, NEON, POP, RealView, SecurCore, Socrates, Thumb, TrustZone, ULINK, ULINK2, ULINK-ME, ULINK-PLUS, ULINKpro,  $\mu$ Vision, Versatile are trademarks or registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere. The related technology may be protected by any or all of patents, copyrights, designs and trade secrets. All rights reserved. Oracle and Java are registered trademarks of Oracle and/or its affiliates. The Power Architecture and Power.org word marks and the Power and Power.org logos and related marks are trademarks and service marks licensed by Power.org.

© NXP B.V. 2019.

All rights reserved.

For more information, please visit: <http://www.nxp.com.cn>

For sales office addresses, please send an email to: [salesaddresses@nxp.com](mailto:salesaddresses@nxp.com)

Date of release: 10/2019

Document identifier: AN12618