

参考文献: LD7580R 应用手册及 IC 规格书

1. 交错式功率因数修正电路(Interleaved Power Factor Correction)背景说明

交错式功率因数校正 (Interleaved PFC) 是一种将多个功率因子校正级并联运作，并透过相位错开来达成整体效能提升的技术。其发展主要受到高功率应用对体积、效率及电磁干扰 (EMI) 等要求的驱动控制器。因应电源产品发展走向轻薄化在产品内部限制高度变得相对严苛，Interleaved PFC 可将 PFC CHOKE 分成两组降低高度，在高度限制的设计上有相对优势，广泛应用在显示器产品。

2. 交错式功率因数修正电路核心优势：

▲涟波电流消除：

透过各相位的错开操作，能有效抵消输入电流和输出电容电流的涟波，显着降低电磁干扰 (EMI)，并允许使用更小尺寸的输入/输出电容器及 EMI 滤波器。

▲磁性组件缩小：

PFC Choke 由 1 组分成两组，减少了单一电感的储能需求，进而缩小了电感体积。

▲功率密度提升：

由于组件体积缩小和热管理改善，整体转换器能达到更高的功率密度。

▲热管理改善：

功率耗散分散到多个并联级，有助于更好的散热。

▲效率提升：

尤其在高功率应用中，交错式设计能降低导通损耗，提升整体系统效率符合 ESG，达到节能减碳。透过切相 (phase shift management) 技术，也能优化轻载效率。

▲组件应力降低：

分散电流负载有助于减少开关组件的电流应力。

3. 交错式 PFC 控制器工作模式说明

交错式 PFC 通常由两个或多个升压 (Boost) 转换器并联组成，共同驱动一个直流总线电路。升压转换器因其输入电流连续且易于控制而被广泛用于 PFC 应用。每个并联的升压转换器以固定的相位差独立开关。在双相交错式 PFC 中，两个升压转换器会以 180 度反相的方式运行。由于各阶段的电感电流涟波彼此反相，它们在总输入电流中会部分抵消。这种抵消效应在 50% 的工作周期下最为显着，甚至可将输入电流涟波降至接近零。为了实现精确的电流波形和相位控制，交错式 PFC 需要更复杂的控制电路，可能包含电压环、电流环以及负载平衡控制器，LD7580R 采用数字控制达到成本优化、高度可靠性、提升轻重载效率达到节能减碳，同时也是通嘉科技追求的 ESG 目标，单相与交错式 PFC 比较见表 1。

特性	单相 PFC	交错式 PFC (Interleaved PFC)
输入电流涟波	较高，需较大 EMI 滤波器	显着降低，允许更小的 EMI 滤波器
输出电容涟波	较高，需较大输出电容	显着降低，允许更小的输出电容
磁性组件体积	较大	减小，因分散功率并降低涟波
功率密度	较低	较高
热管理	集中于单一组件，散热压力大	功率分散，热管理较佳
效率	依设计而定	整体效率高，轻载效率可透过切相优化
控制复杂性	相对简单	较为复杂，但有专用 IC 与数字控制器简化，如 LD7580R
组件数量	较少	较多，但单一组件 Derating 降低
适用功率	通常适用于中低功率 (<250W)	适用于中高功率 (<1kW)
表 1 单相与交错式 PFC 比较		

4. 通嘉交错式 PFC LD7580R 控制器技术特点说明

LD7580R 是一款用于两相交错式功率因子校正器的“数字”IC 控制器，具有 180° 相移。由于采用了 180° 相移，输入电流涟波显着降低。其专有的电压模式控制算法可实现接近 1 的功率因子，内建补偿功能，并改善总谐波失真 (THD)。LD7580R 具有高度集成，仅需极少的外部组件，采用了 180°C 项移”专利”；以及 COMP 内建”数字”补偿，省去外部的 RC 组件。内建强大的安全保护机制，简化了设计，并确保在高温下可靠运作。

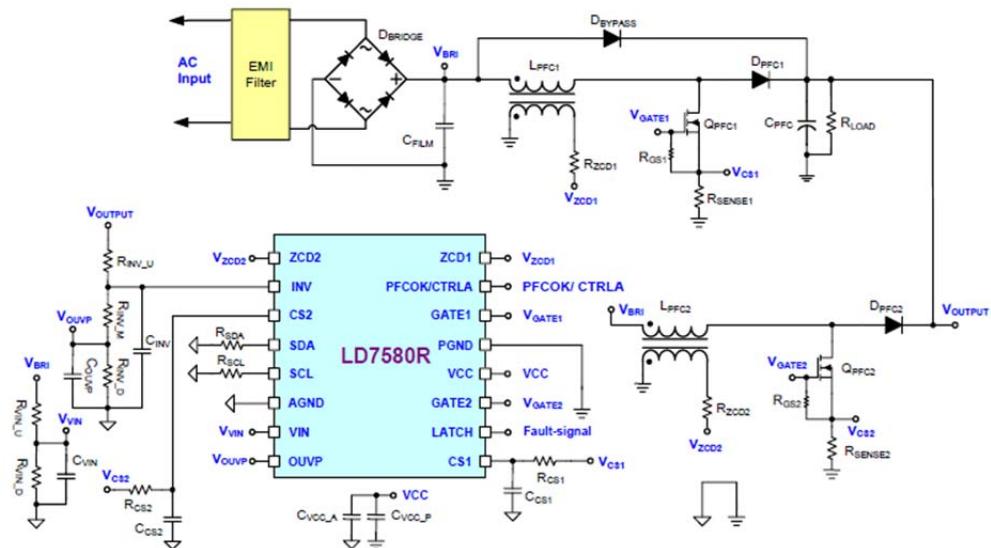


图 1 LD7580R 控制器电路

5. LD7580R“数字”式核心 IC 特点

LD7580R 专为交错式升压拓朴功率因子校正而设计的数字 IC。它采用 DCM 工作模式和频率限制方法，并透过 FW 调适方式调整各项关键参数，在所有线路和负载工作范围内实现了高效率、高节能。基于具有 THD 优化功能的电压模式控制算法(Voltage mode control)，LD7580R 可在低线路输入和满载条件下以过渡模式 (CrM) 运行，在高电压输入或轻载条件下以 DCM 模式运行，并具有超低 THD。对于交错式功率因子校正的相移，其内部数字相移控制模式 (Leadtrend 专利) 可在任何线路 / 负载条件下实现 180 度相移。LD7580R 透过 GUI 调整内部参数，在功能灵活性，设计复杂度，精度与可靠性方面皆取代传统模拟 IC 设计上的缺点，实现方式如图 2，数字核心 IC 优势如表 2。

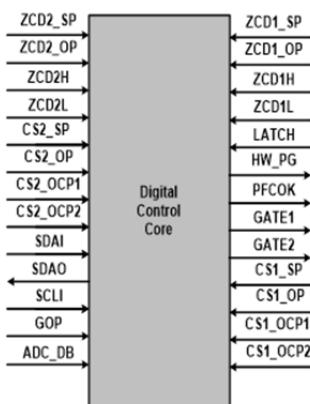


图 2 LD7580R Digital Control Core

数字 IC 与仿真 IC 差异比较：

特性项目	数字 IC 优势	模拟 IC 挑战
抗噪声能力	极强, 信息以离散逻辑状态表示, 不易受干扰。	易受噪声影响, 任何干扰都会导致讯号失真。
精度与可靠性	可透过位数增加来任意提高精度, 易于实现错误校正, 产品一致性高。	精度受限于组件特性与制程, 易受组件漂移、老化影响, 重复性较差。
功能灵活性	透过软件程序设计实现多种功能, 设计弹性高, 便于功能升级和修改。	功能固定由硬件电路决定, 修改功能需重新设计硬件。
设计复杂度	高度模块化, 可利用 EDA 工具自动化设计, 设计效率高。	设计复杂, 对组件匹配、寄生效应敏感, 需人工调整优化, 设计时间长。
集成度与尺寸	可高度整合数十亿晶体管, 实现小尺寸、高功能密度。	集成度相对较低, 相同功能所需面积较大。
数据储存与处理	易于数据储存、读取和进行复杂运算 (如 DSP), 内存应用广泛。	难以直接储存信息, 复杂运算实现困难。
成本效益	大规模量产时单位成本较低, 因制程标准化且良率高。	设计和制造门坎高, 小量生产成本高昂。
功耗	可透过频率闸控、睡眠模式等技术实现低功耗, 尤其在待机或低速运行时。	通常持续消耗功率, 难以实现深度节能模式。

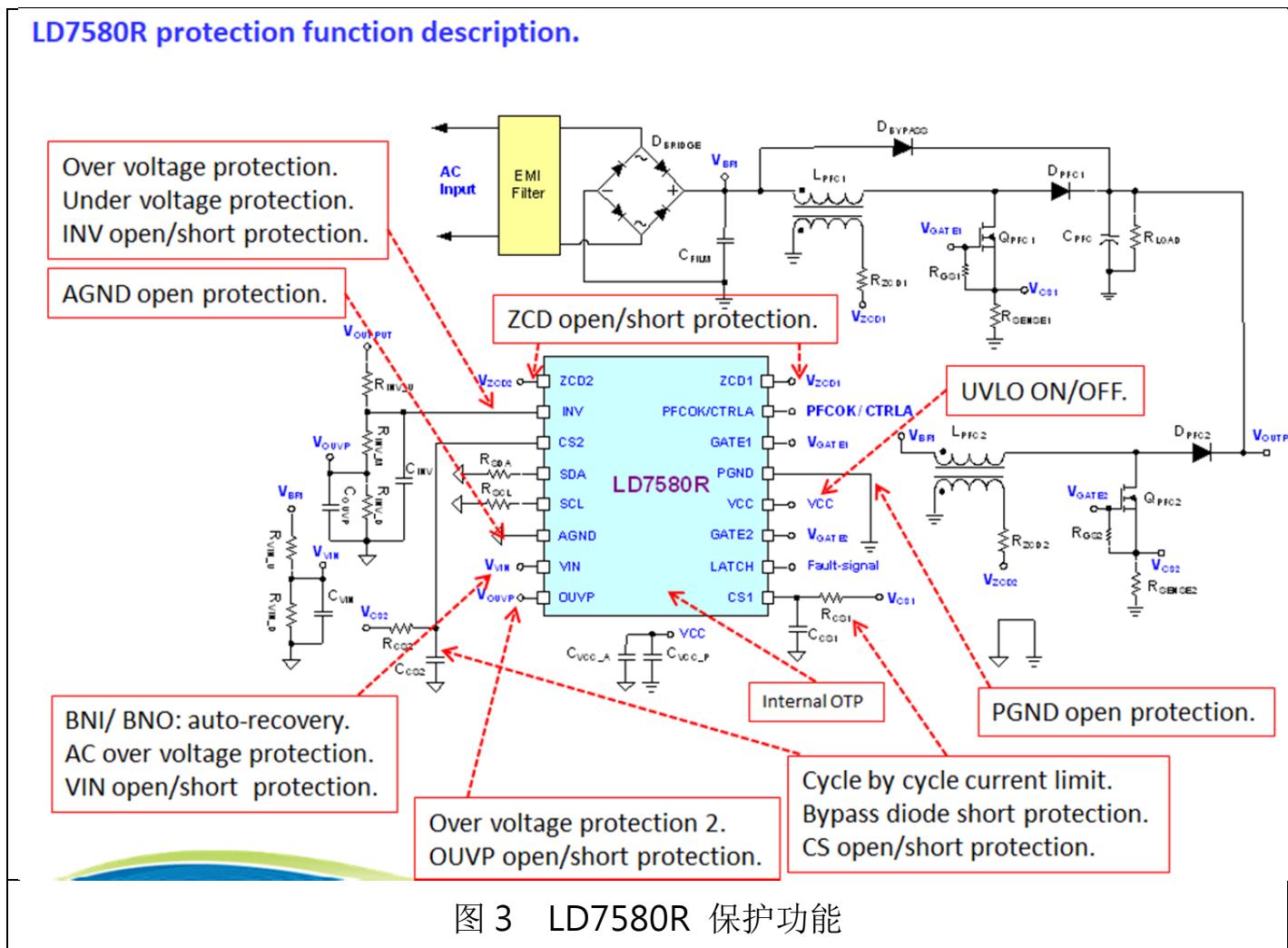
表 2 数字 IC 优势

6. 通嘉交错式 PFC Controller(LD7580R)技术特点说明

- A. 数字控制器适用于参数设定。
- B. 高功率因子。
- C. 内建 THD 增强器。
- D. 轻载 DCM 模式操作达到高效功能。
- E. 所有条件（包括瞬态条件）下均支持 180° 相移。
- F. CrM/DCM 工作模式。
- G. Driving 能力 Source=700mA, Sink=-1200mA。
- H. Cycle by Cycle Current Limit。
- I. 内建过温度保护(INT. OTP)。
- J. 内建数字补偿，以及轻载关闭一项位，优化效率。
- K. 完善的保护机制。
 - 1. 欠压侦测&过压侦测 on VIN pin。
 - 2. 过压保护(1st, 2nd OVP) on INV/OVUP pin。
 - 3. 欠压保护 on VIN pin。
 - 4. 零电流侦测绕组开路&短路保护 on ZCD pin。
 - 5. IC GND 开路保护。
 - 6. 旁路&升压二极管短路保护。
 - 7. LATCH 接脚上的外部锁定功能。

7. LD7580R 各 Pin 脚保护功能

LD7580R 针对不同 Pin 脚设置了完整的保护功能，以确保产品的可靠度，以避免在异常状态(来料不良，外部硬力)下造成损伤，针对 PFC 周边组件设置了全面的保护，如：二段式过电压保护，PFC 二极管短路保护，AC 过电压保护，让单一零件失效时，确保产品不会严重损伤，LD7580R 保护功能如图 3，表 3 为仿真单一组件失效，在各种不良条件下 LD7580R 皆进入保护，确保产品的可靠度。



Item	短路后开机	开机前短路
PFC 升压二级管	无损伤	无损伤

Item	短路后开机	开机前短路
PFC 电感	无损伤	无损伤
PFC bypass 二级管	无损伤	无损伤
电流取样电阻	进入 idle mode 无损伤	无损伤
INV short to ZCD2 (PIN2 short to PIN1)	触发 OVP2 保护	进入 Time Out1 保护
INV short to CS2 (PIN2 short to PIN3)	触发 CSOP 保护	触发 CSOP 保护

表 3 单相与交错式 PFC 比较

7.1 LD7580R 工作频率说明

对于 Transition-Mode PFC，开关频率是变动的，并且随着负载的减少，电感放电时间速度快，导通时间固定的情况下，工作频率变快。为了在整个输出负载范围内获得良好的效率效能，LD7580R 实施了频率限制曲线，以减少轻负载时高开关频率造成的额外损耗。LD7580R 实现了 GUI 可设定的最大频率限制 (45kHz~300kHz) 功能，以提高输出轻载/输入高电平条件下的效率，进一步完成节能减排目标。开关频率限制降低点 (R_{FFO}) 可透过图形用户接口 (GUI) 设定。最小开关频率限制 ($f_{SW_LIM_MIN}$) 固定为 25kHz，以避免开关噪声。开关频率限制的斜率定义图 4。

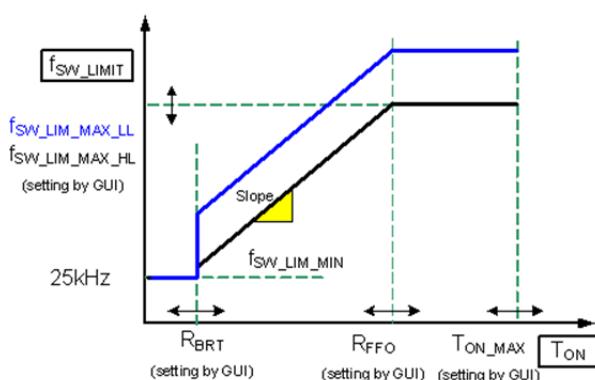


图 4 LD7580R 频率限制曲线

由于频率限制功能，轻载效率显著提升效果如图 5。

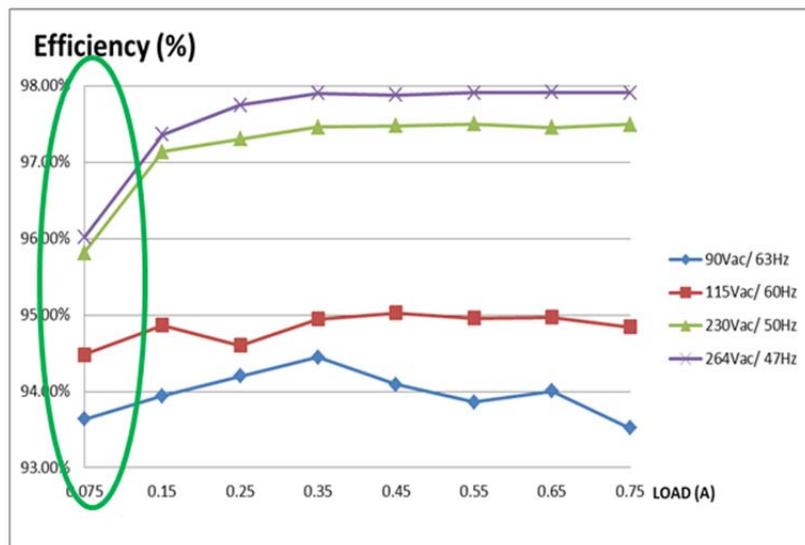


图 5 LD7580R 轻载效率优化

7.2 LD7580R 轻载相位关闭说明

由于轻载条件下切换损失占比大于导通损失，LD7580R 在轻载条件下实现第二相关闭功能”专利”，减少切换损失以提高效率。第二相关闭点 (R_{PH_OFF}) 和第二相开启点 (R_{PH_ON}) 皆可透过 GUI 设定。由于最大导通时间采用非线性前馈补偿，第二相关闭的负载条件在不同的输入电压下均有效。建议 R_{PH_OFF} / R_{PH_ON} 的值应小于 $40\% * T_{ON_MAX_BNI}$ ，达到轻重载效率兼顾。LD7580R 还实现了突发模式阈值电平 (R_{BRT}) 的可设定比率，该比率是最大导通时间 ($T_{ON_MAX_BNI}$) 的百分比，相位开启关闭说明如图 6。

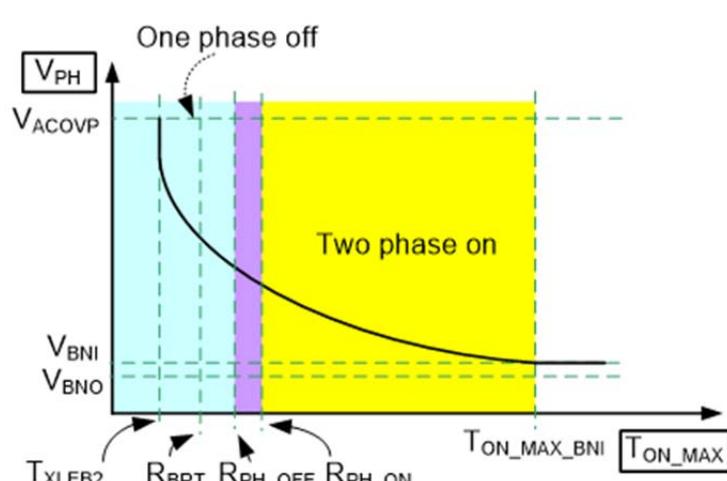


图 6 LD7580R 相位开启关闭说明

7.3 LD7580R 最大导通时间说明

CRM / DCM PFC 最大导通时间由 PFC 电感感量决定, LD7580R 可透过图形用户接口 (GUI) 设定输入电压最低时的最大导通时间 ($T_{ON_MAX_BNI}$) (5~40us), 以适应不同的输出功率应用。根据适当的最大导通时间 ($T_{ON_MAX_BNI}$) 值, LD7580R 可基于 V_{PH} 自动实现非线性前馈补偿, 进而针对不同的输入电压自动调整最大导通时间。最小导通时间 (T_{ON_MIN}) 也可透过 GUI 设定, 范围为 T_{XLEB2} 至 0.1*最小导通时间($T_{ON_MAX_BNI}$)。

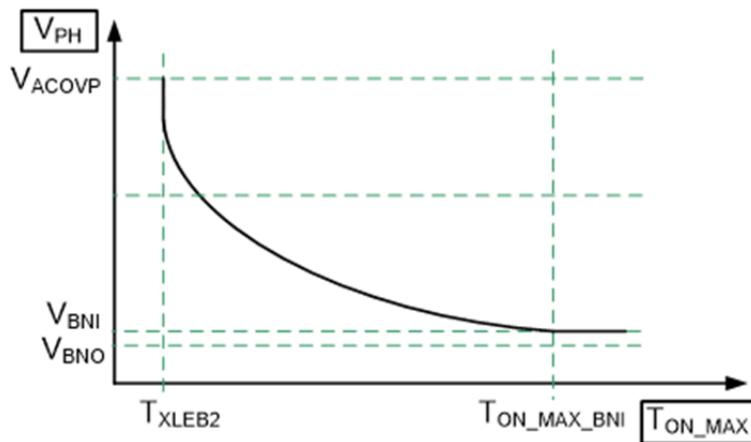


图 7 LD7580R 最大导通时间设定说明

7.4 LD7580R 回授功能说明

LD7580R 内建数字回馈以调节输出，带宽可在 5~25Hz 范围内设置，相位裕度可透过 GUI 在 45 度至 80 度范围内设定，回馈讯号透过 INV Pin, Vin Pin, OUVP Pin 取样，电路如图 8。

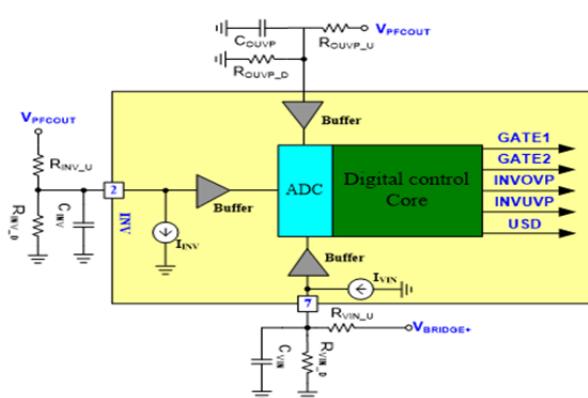


图 8 LD7580R 回授电路

7.4.1 INV Pin 功能说明

INV Pin 借测电解电容电压并藉由电阻 R_{INV_U} 及 R_{INV_D} 进行分压，取样讯号经由 ADC(模拟数字转换器)转换至数字控制达到稳压效果，参考电压(Vref)为 2V，INV 同时设置 1st OVP 功能， INV OVP 参考位准 ROVP 为 108%，设计准则如下：

输出电压对应 Vref 电压公式：

$$V_o = 2V \cdot \left(1 + \frac{R_{INV_U}}{R_{INV_V}}\right)(V)$$

设置 Bulk 电压为 395V，可推得 R_{INV_U} 为 6M ohm， R_{INV_D} 为 30.5k ohm。

$$V_o = 2V \cdot \left(1 + \frac{6M}{30.5k}\right) = 395V$$

1st OVP = VREF * ROVP = 2 * 108%，可推得 1st OVP 为 427V。

$$V_{oovp} = 2V * 1.08 \cdot \left(1 + \frac{6M}{30.5k}\right) = 427V$$

7.4.2 OUVPin 说明

LD7580R 设置了 2nd OVP，增加产品可靠性，可避免当 INV 取样电阻发生异常状态时，可以触发 2nd OVP 以确保不会损伤 Bulk Cap，当 VOUPV 高于 VOVP2 ($V_{REF}=2V$)，则触发第二过压保护 (2nd OVP)，LD7580R 将立即关断，直到 V_{OUVP} 低于 $V_{OVP2} * R_{OVP2H}$ (97.5%，典型值)，PFC 恢复正常工作，2nd OVP 原理如图 9。

$$V_{oovp} = 2V \cdot \left(1 + \frac{R_{OUVP_U}}{R_{OUVP_D}}\right)(V)$$

设置 2nd OVP 电压为 438V，可推得 R_{INV_U} 为 6M ohm， R_{INV_D} 为 27.5k ohm

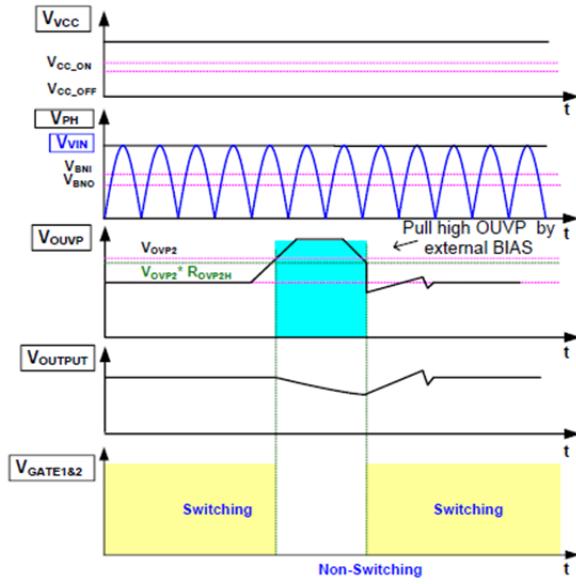


图 9 OUVP Pin 原理说明

7.4.3 VIN Pin 功能说明

LD7580R 在 V_{IN} 引脚上实现了峰值电压保持功能。 V_{IN} 引脚的峰值电压 (V_{PH}) 用于 Brown in / Brown out。当 $V_{PH} > V_{BNI}$, V_{GATE1} & V_{GATE2} 开始工作, 如图 10 所示。 VIN 同时侦测 AC 整流正弦波上升沿, 一旦 $V_{IN} \geq V_{ACOVP}$ (典型值 2.05V), $ACOVP$ 被触发, 对于电力不稳的地区, 有更高的可靠性。LD7580R 提供一个内部恒定源电流 I_{VIN} (典型值 200nA), 用于 V_{IN} 接脚开路保护。

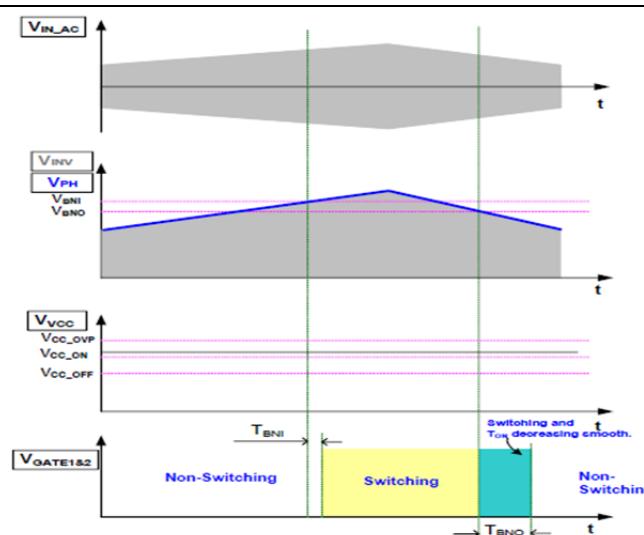


图 10 Vin Pin 功能说明

7.5 LD7580R THD 补偿功能说明

对于操作模式采用过渡模式 CRM 工作的 PFC Controller, 电感器的负电流是由输入电压的谷底开关引起的。如果输入交流电压接近 0 / 180 度时, 负电流等于或大于电感器的充电电流, 则会发生零点电流失真, 导致总谐波失真 (THD) 增加, 如图 11 所示。

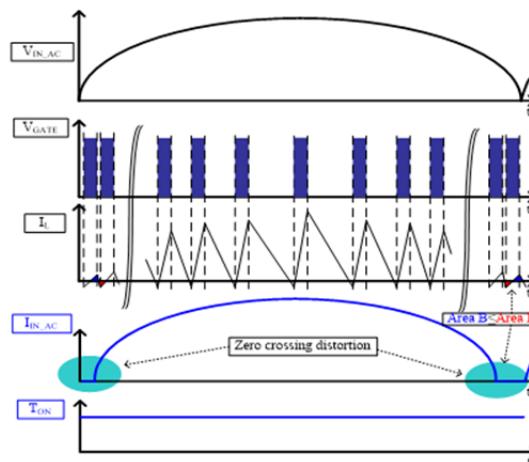


图 11 波谷电流失真示意

当输入交流电压接近 0 / 180 度时, 平滑地增加导通时间可以改善过零失真, 如图 12 所示, LD7580R 工作在 VOT(variable on time)模式下, 以实现低 THD 和高功率因子(PF), 导通时间的变化取决于输入电压、电感器的充电/放电时间和关断时间。

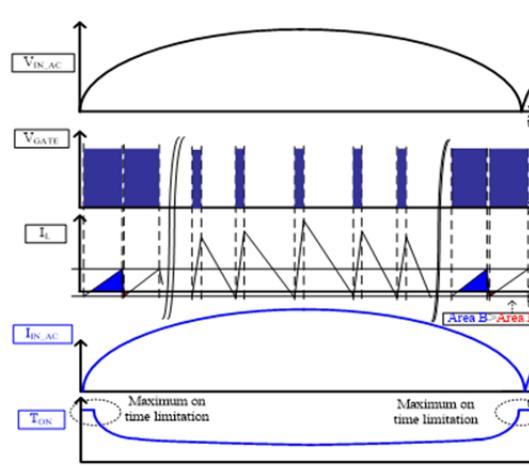


图 12 LD7580R VOT 模式

在 300W 的演示版上可以发现不论在轻载或是高电压输入的条件下，LD7580R 实现了低 THD 与高功率因子，如图 13，实现了降低材料成本，并简化设计复杂度，效能表现高于常规 Interleaved PFC IC。

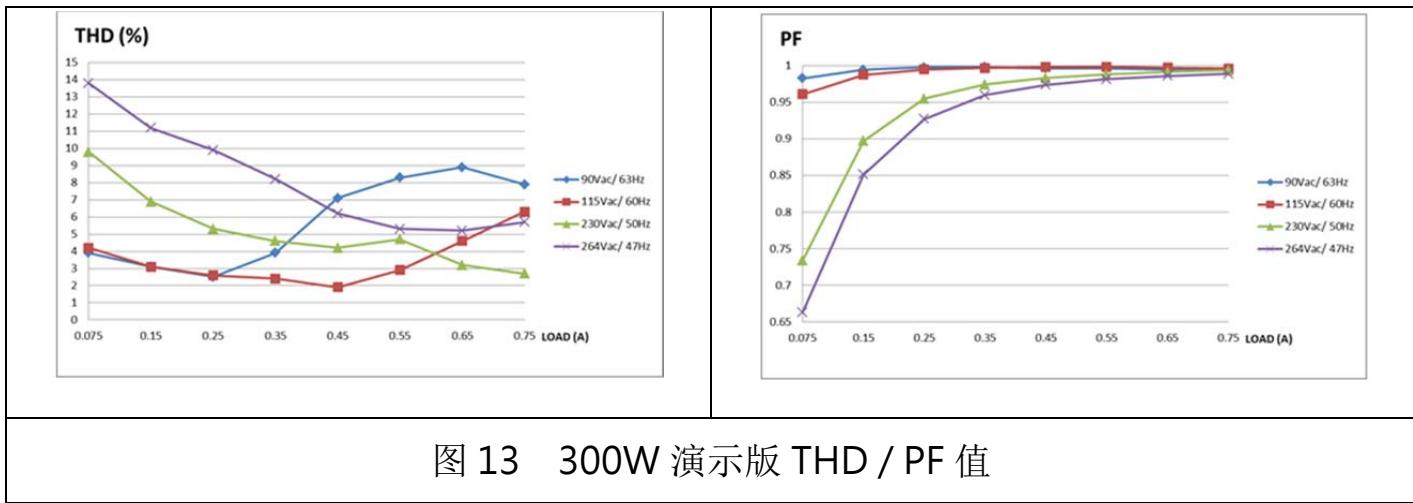


图 13 300W 演示版 THD / PF 值

7.6 LD7580R：零电流侦测采用辅助绕组采样

LD7580R 零电流侦测模块($V_{ZCD1\&2}$)侦测辅助绕组讯号以驱动 MOSFET。在闸极关断期间，如果 $V_{ZCD1\&2}$ 高于 $V_{1\&2QRDH}$ (0.75V, 典型值, 一次电平触发)，则每次低于 $V_{1\&2QRDL}$ (0.25V, 典型值, 下降沿触发) 时，电感电流都会在第一个谷值处闭合为零。根据输出负载条件定义的频率限制，如果谷值讯号出现在频率限制之后，则 LD7580R 工作在 CRM 模式，如图 14 所示。反之，如果频率限制出现在谷值讯号之前，则 LD7580R 工作在 DCM 模式，如图 15 所示，藉由工作模式的切换，进而达到各种负载条件下的效率优化。对于典型应用（输出电压为 390~450V），建议变压器的匝数比约为 10。

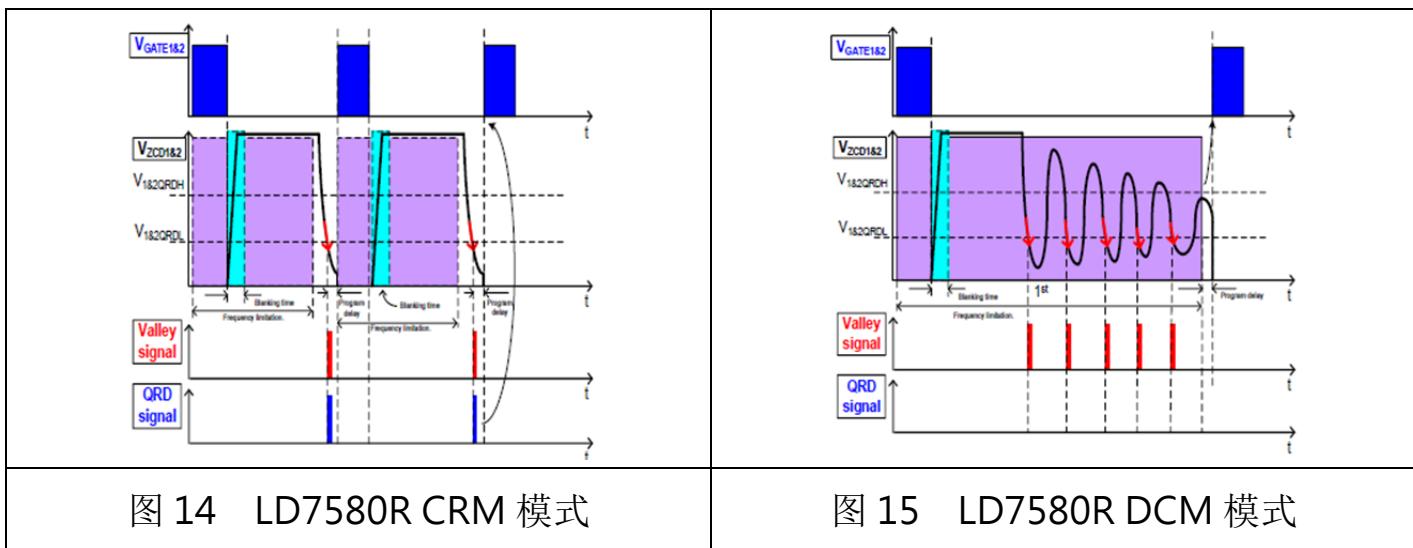


图 14 LD7580R CRM 模式

图 15 LD7580R DCM 模式

7.6.1 ZCD VCCOK 功能说明

如图 16 所示, $V_{CCOK} (V_{VCC} \geq V_{CC_ON}, \text{典型值 } 12.0V)$ 后, LD7580R 为 Z_{CD1} 和 Z_{CD2} 脚位提供两个内部恒定电流源 ($I_{1\&2ZCD_PBG}$, 典型值 $10 \mu A$), 以检查焊接状态。如果 $V_{ZCD1\&2}$ 高于 $V_{1\&2ZCDOP}$ (典型值 $2.0V$), 则触发 ZCD 开路保护 (Z_{CDOP}), LD7580R 进入空闲模式, 并在 T_{IDLE} (典型值 $60ms$) 后重复检查。如果 $V_{ZCD1\&2}$ 低于 $V_{1\&2ZCDSP}$ (典型值 $150mV$), 则触发 ZCD 短路保护 (Z_{CDSP}), LD7580R 进入空闲模式, 并在 T_{IDLE} 后重复进行检查。当 $V_{1\&2ZCDSP} < V_{ZCD1\&2} < V_{1\&2ZCDOP}$ 时, ZCD 检查通过, LD7580R 即可进入下一阶段运作。

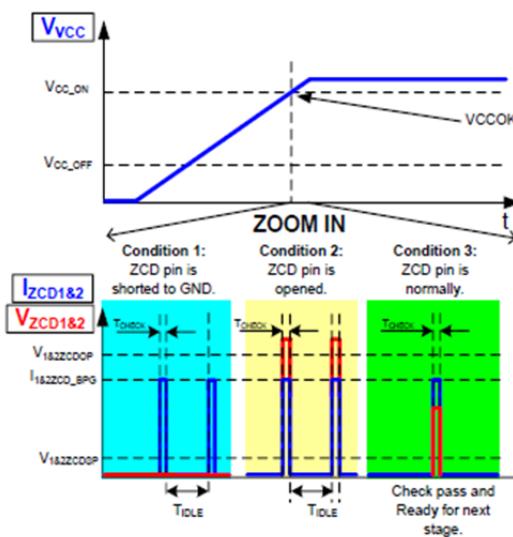
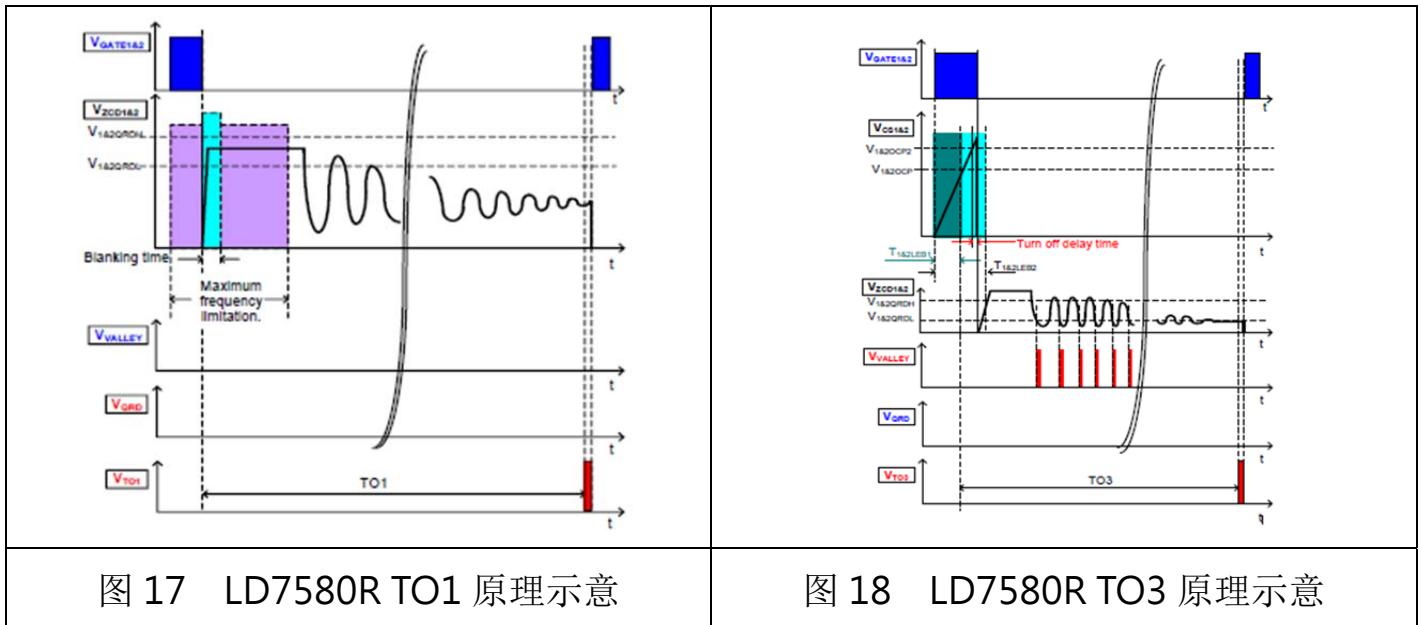


图 16 VCCOK 功能说明

7.6.2 ZCD Time out 功能说明

在闸控关闭期间,如果谷底讯号未被触发,则表示 $V_{ZCD1\&2}$ 始终低于 $V_1\&V_{2QRDH}$, Time out 1 功能启动。开关周期限制在 T_{O1} (典型值 $200\ \mu s$)。如图 17 所示。当 $G_{ATE1\&2}$ 脚在 $T_{1\&2LEB1}$ (典型值 100ns) 和 $T_{1\&2LEB2}$ (典型值 200ns) 之间上升时,一旦 $V_{CS1\&2}$ 高于 $V_{1\&2OCP2}$ (典型值 $0.96V$), LD7580R 将立即关断,此时已启动保护)。下一个开关周期限制在 T_{O3} (典型值 $800\ \mu s$), 以防止损坏。如图 18 所示。



7.7 CS Pin 功能说明

CS 脚位侦测 PFC Mosfet 电流,也就是电感电流,当电流侦测引脚的最大电压阈值设定为 $0.6V$ (透过 GUI 设定),当电压阈值上升至 $0.6V$ 将 MOSFET 关断达到 Cycle by Cycle current limit,以防止 PFC 电感饱和,电感饱和计算公式如下, Lm 为 PFC 电感量, IL 为电感电流, Np 为 PFC 电感圈数, Ae 为铁芯截面积, 触发波形如图 19。

$$B_{max} = \frac{Lm * IL}{N_p * Ae}$$

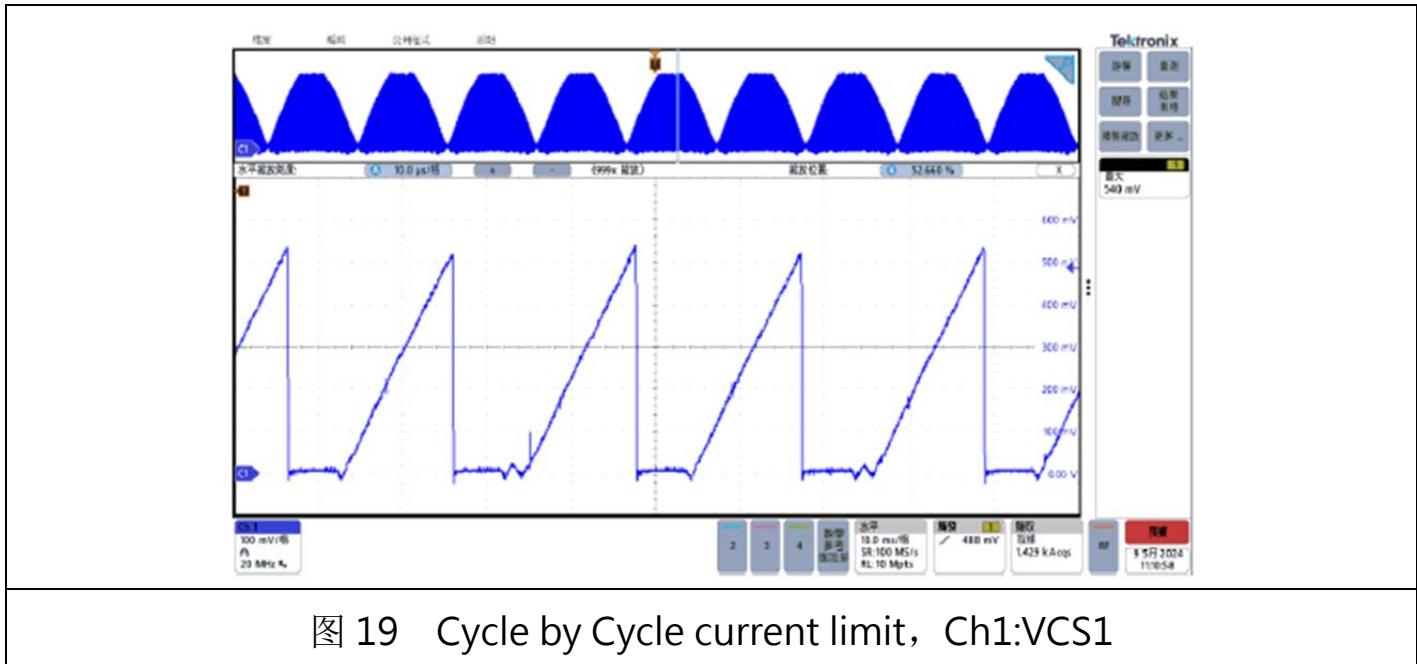


图 19 Cycle by Cycle current limit, Ch1:VCS1

7.8 LD7580R 换相(Phase management)说明

取两相 Gate 的驱动波形, 如图 1 为例, 以 Gate1 当作为基准, 计算出 Gate1 完整周期为 Time 1, 并从 Gate1 导通计时至 Gate2 导通作为 Time2, 由 Time 2 / Time 1 得到 Phase shift, 以图 20, 21, 得到 Time 1 = 23.2us, Time 2 = 11.6us, Phase shift = $11.6\text{us} / 23.2\text{us} = 0.5 \rightarrow 0.5 * 360^\circ = 180^\circ$ 相移

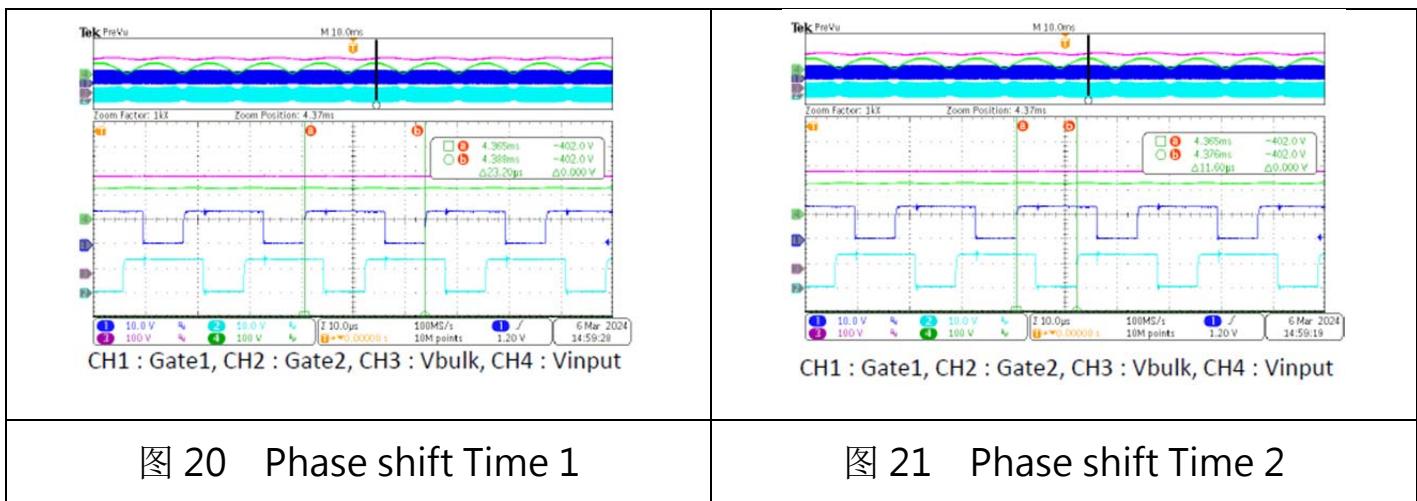


图 20 Phase shift Time 1

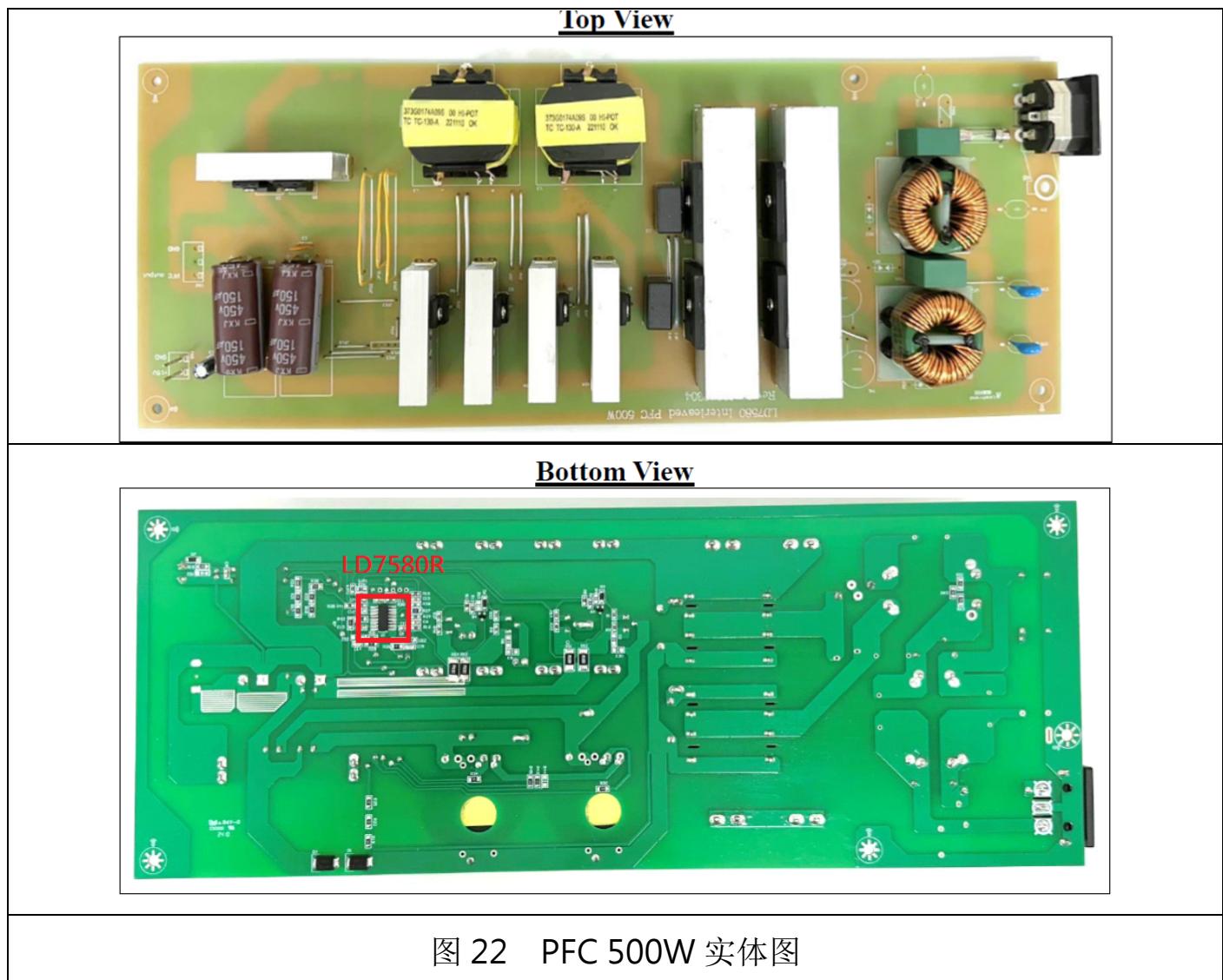
图 21 Phase shift Time 2

8 通嘉 Interleaved PFC 500W Demo Board 设计范例

Interleaved PFC : LD7580R

PCB Size: 366.5mm(L) x 142.25mm(W)

输出功率 : 390V/1.28A,



PF 值 / 效率 / THD 测试

Test Condition :

Input : 90 ~ 264Vac

Output : 10% Load ~ 100% Load

V_{INAC} (V/Hz)	$V_{BUS,SET}$ (V)	$V_{BUS,PCB}$ (V)	I_{OUT} (A)	P_{BUS} (W)	P_{IN} (W)	PF	η (%)	THD (%)	Requirement (%)
90/47	390	392	1.278	500.976	533.65	0.997	93.88	5.99	> 90
		392	0.958	375.536	397.6	0.996	94.45	7.47	
		392	0.638	250.096	263.11	0.994	95.05	9.96	
		392	0.319	125.048	132.1	0.995	94.66	6.92	
		392	0.128	50.176	53.36	0.891	94.03	3.96	
115/60	390	392	1.278	500.976	525.28	0.996	95.37	7.17	> 90
		392	0.958	375.536	261.99	0.995	95.46	5.45	
		392	0.638	250.096	261.99	0.995	95.46	6.81	
		392	0.319	125.048	130.93	0.990	95.51	3.78	
		392	0.128	50.176	52.93	0.866	94.80	6.53	
230/50	390	392	1.278	500.976	513.91	0.990	97.48	6.98	> 90
		392	0.958	375.536	385.3	0.988	97.47	5.13	
		392	0.638	250.096	256.77	0.978	97.40	5.67	
		392	0.319	125.048	128.56	0.911	97.27	9.95	
		392	0.128	50.176	52.21	0.726	96.1	22	
264/63	390	392	1.278	500.976	511.8	0.984	97.89	7.26	> 90
		392	0.958	375.536	384.07	0.974	97.78	8.10	
		392	0.638	250.096	255.94	0.919	97.72	9.56	
		392	0.319	125.048	128.28	0.838	97.48	17.46	
		392	0.128	50.176	52.14	0.632	96.23	33	

表四 Demo Board P.F / Eff. / THD

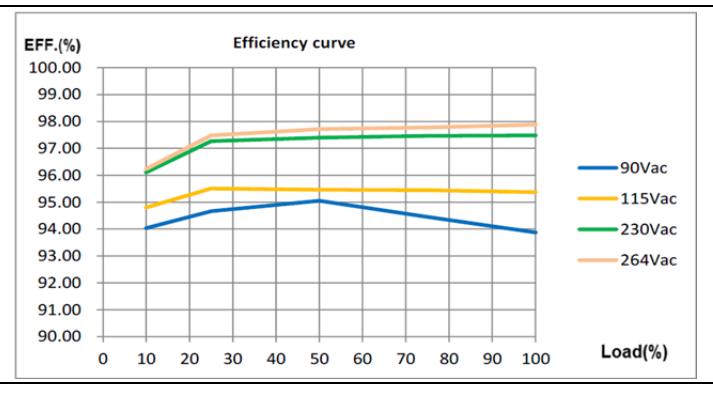


图 23 500W Demo Board Eff. 展示图

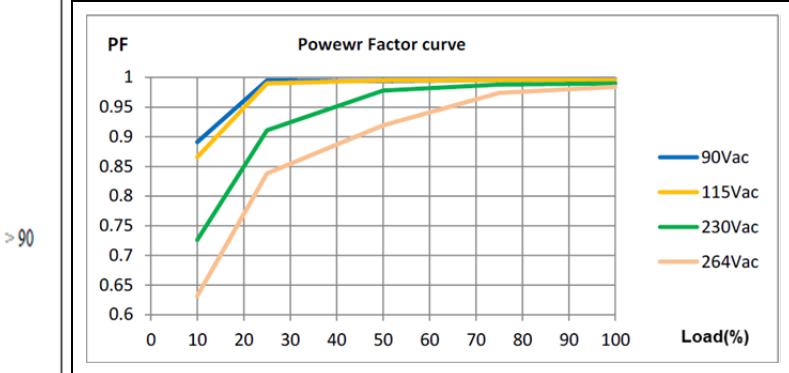


图 24 500W Demo Board P.F 展示图

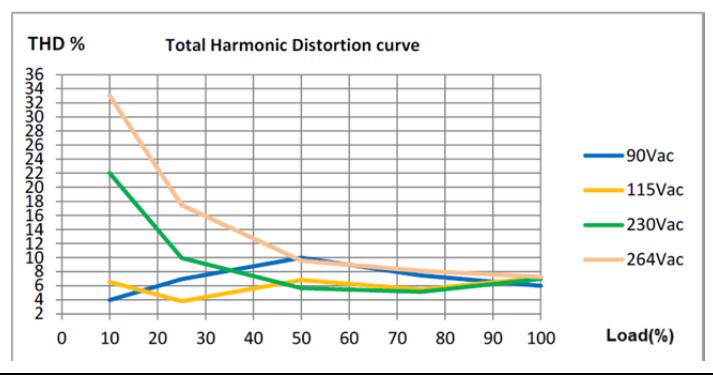


图 25 500W Demo Board THD 展示图

Phase Shift 测试

Input Voltage	90 V _{AC} / 47 Hz	115 V _{AC} / 60 Hz	230 V _{AC} / 50 Hz	264 V _{AC} / 63 Hz
Output Current	Full Load			
Measured Point of Output Voltage	End of PCB			
Requirement	45%~55% (162°~198°)			

V _{BUS,SET} (V)	V _{IN,AC} (V / Hz)	AC crest Phase shift		AC Valley Phase shift		Requirement (%)
		(%)	(°)	(%)	(°)	
390	90 / 47	49.46	178	50	180	45%~55% (162°~198°)
	115 / 60	49.61	178.5	48.51	174.6	
	230 / 50	50	180	50	180	
	264 / 63	50	180	50.58	182	

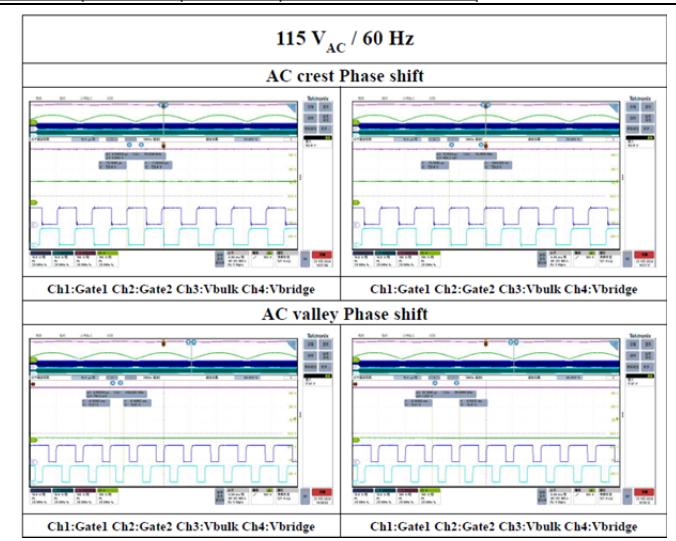
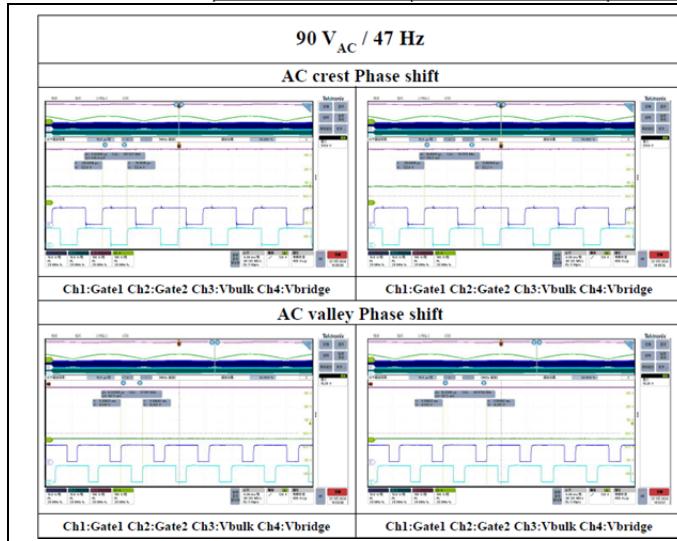


图 26 Phase shift 90Vac

图 27 Phase shift 115Vac

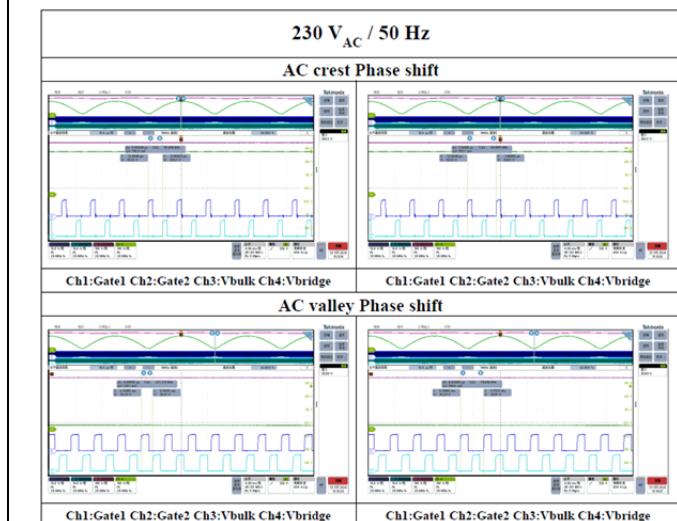


图 28 Phase shift 230Vac

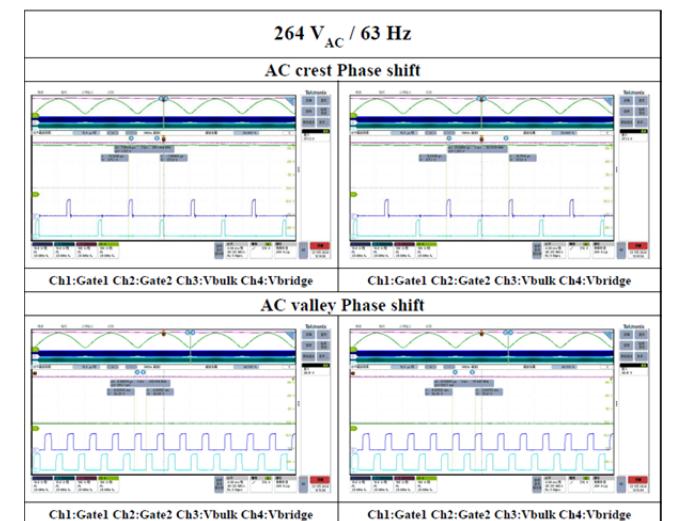


图 29 Phase shift 264Vac

通嘉控制器数字交错式 PFC LD7580R 能有效提升电源转换的效率和功率因子，这不仅是技术上的卓越，更是对环境永续发展的积极贡献，直接体现了节能减碳的效益。同时，它显着降低电流涟波，这不仅有助于缩小电路体积和降低成本（尤其在高功率应用中），进一步优化资源利用、减少碳足迹，呼应企业在 ESG (环境、社会与公司治理) 中环境 (E) 面向的承诺。

透过数字控制的弹性，LD7580R 能实现复杂的控制算法和全面的保护功能，从而提升电源系统的整体性能、可靠性与智能化程度。这些特性强化了电源系统的稳定性和安全性，不仅符合严格的产业标准，也为客户的永续运营提供了坚实基础，展现了良好的公司治理 (G) 与社会责任 (S)。

这种技术使得电源供应器能够更好地应对不断提高的效率要求、更严格的法规限制（特别是全球日益收紧的能源效率与碳排放标准，助力客户达成其节能减碳目标）以及日益复杂的应用需求。它是现代高性能、高功率密度电源设计的重要发展趋势，亦是企业在追求技术创新的同时，积极落实 ESG 策略的关键环节。通嘉科技在市场上受到客户的认可，并有大量量产经验，我们将提供最详细的信息及应用说明给您，同时请支持老牌 AC-DC 通嘉产品联系方式如下

通嘉 FAE 张孝泽

E-mail: Easonchang@leadtrend.com.tw

