

产品特点：

- ✓ 三相 115Vrms 交流输入 PFC 模块
- ✓ 自适应 47~800Hz 宽输入频率范围
- ✓ 270V 主路输出
- ✓ 200V Buck 输出
- ✓ 1500W 连续输出功率（基板温度 100 摄氏度）
- ✓ 94.5%的转换效率
- ✓ 极低的输入浪涌电流
- ✓ 功率密度高达 4110W/cm³

EPFC-3PAW-1K5-270-F

产品规格书

PRODUCT SPECIFICATION

制造安全产品 驱动绿色世界 Power a Safe and Green world

Excellent 卓越 Creative 创造 United 协作



合肥华耀电子工业有限公司

ECU ELECTRONICS INDUSTRIAL CO.,LTD.



电话 TEL 4006659997/0551-62731110

传真 FAX+86-551-65324417 转 0

安徽省合肥市蜀山区淠河路 88 号 No.88 <http://www.ecu.com.cn>

Pihe road P.O BOX 9023-20,Hefei
China

<http://www.ecupowersupply.com>
sales@ecu.com.cn



APPLICATIONS

- 航空电子设备
- 航空地面测试系统
- 航空地面模拟设备

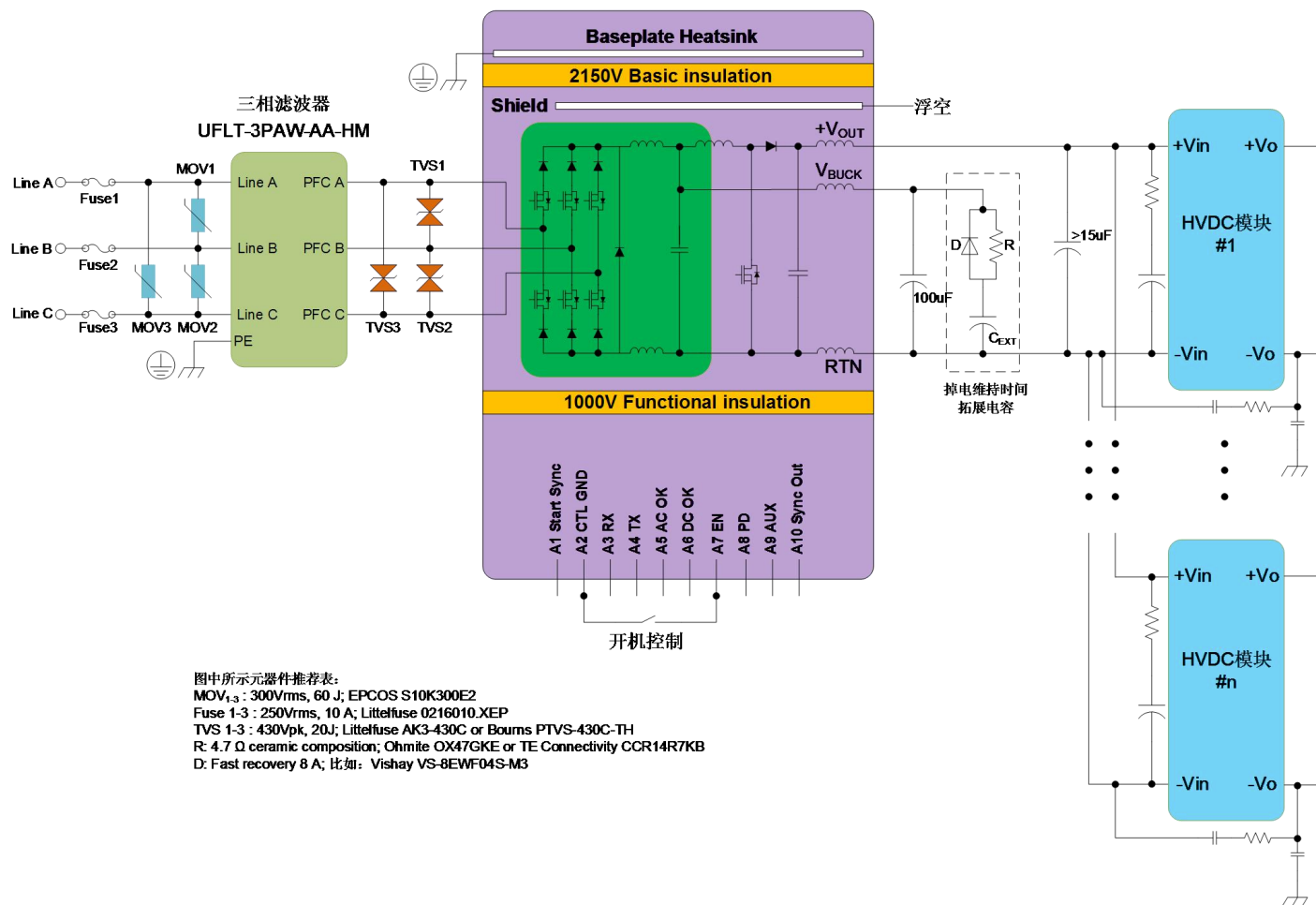
Description 概述

EPFC-3PAW 是三相三线相电压 115Vrms 交流输入、直流输出功率因素校正模块电源，采用标准全砖尺寸，具有极高的功率密度和温度性能，基板温度 100 摄氏度的情况下连续输出功率高达 1500W。全数字控制方案为模块的应用提供了各种灵活性和功能组合，超低谐波失调性能为应用系统创建优良的电磁环境；**基于 Buck 拓扑的功率变换电路无需担心开关管全部同时导通的情况下发生输入短路、危害电网系统安全的情况**，同时还具备良好的软启动功能、无需额外复杂的防浪涌电路。

特性

- 三相 115Vrms 交流输入 PFC 模块
- 自适应 47~800Hz 宽输入频率范围
- 270V 主路输出
- 200V Buck 输出
- 1500W 连续输出功率（基板温度 100 摄氏度）
- 94.5% 的转换效率（115Vrms L-N, 400Hz, 1.5KW）
- 极低的输入浪涌电流
- 最小输出电容
 - V_{BUCK} 输出 100μF 典型值
 - +V_{OUT} 输出 22μF
- 功率密度高达 4110W/cm³
- 支持全载启动
- 极低的谐波和低至 2.5% 的 THD 性能，
- 功率因素达到 0.99 @400Hz/1.5kW
- 紧凑的全砖尺寸
 - 65mm x 121mm x 13mm
- 工作壳体温度范围：
 - i : -40 ~ 85°C
 - s/m : -55 ~ 100°C
- 满足军规标准：
 - GJB 181B
 - GJB 151B
 - GJB 150B

*****典型应用电路*****



性能规格(at $T_A=+25^{\circ}\text{C}$)

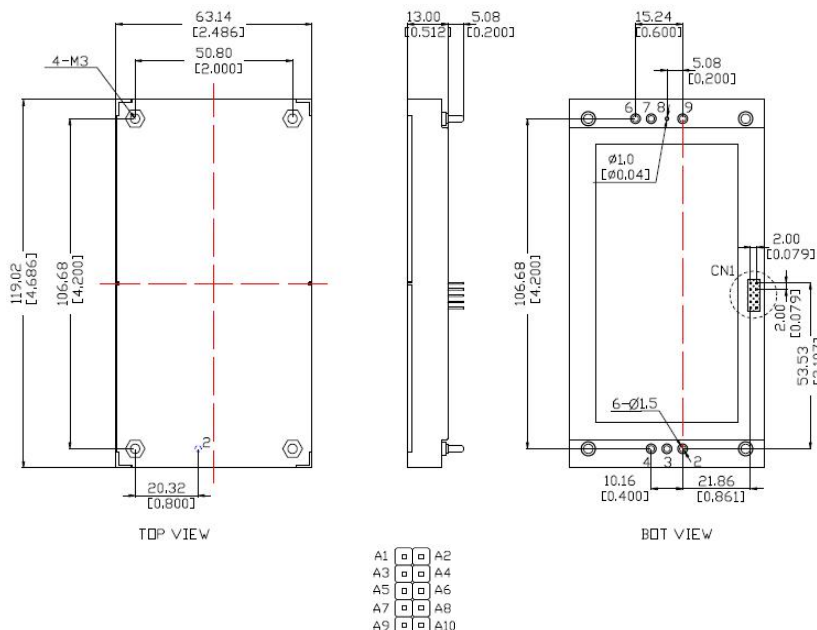
型号	输入范围 (Vrms, L-N)	输出				
		输出功率 (W)	V_{BUCK} 输出		V_{OUT}	
			设定点(V)	效率(%)	设定点(V)	效率(%)
EPFC-3PAW-1K5-270-F	85~140	1500	200	95.5	275	94.5

注: 85~100V 输入时输出功率线性降额, 85V 输入对应的输出功率为 1275W。

机构外形

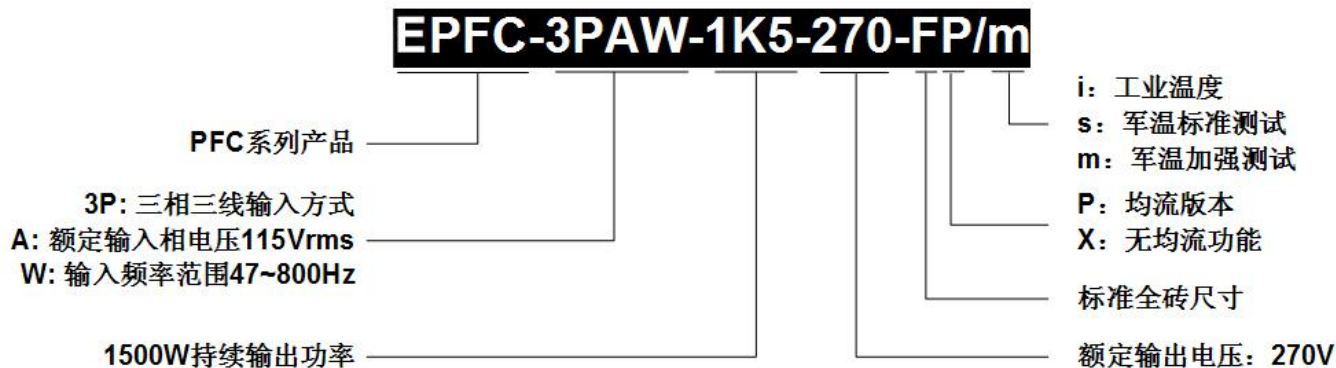
单位: 毫米[英寸]

精度: $x.x \pm 0.5\text{mm}$ [0.02in], $x.xx \pm 0.25\text{mm}$ [0.01in], 除非特别注明



PIN	DESCRIPTION
2	Line A: A 相输入
3	Line B: B 相输入
4	Line C: C 相输入
6	V_{BUCK} : BUCK 输出
7	RTN: 输出回线
8	SHIELD: 屏蔽层
9	+ V_{OUT} : 270V 主输出
A1	Start Sync: 开机同步 (适用于可并联版本)
A2	CTL GND: 控制信号地
A3	RX: 异步收发器接收
A4	TX: 异步收发器发送
A5	AC OK: 交流输入正常
A6	DC OK: 直流输出正常
A7	EN: PFC 开启使能, 负逻辑
A8	PD: 保护功能屏蔽
A9	AUX: 辅助源
A10	SyncOut: 频率同步输出

订货信息

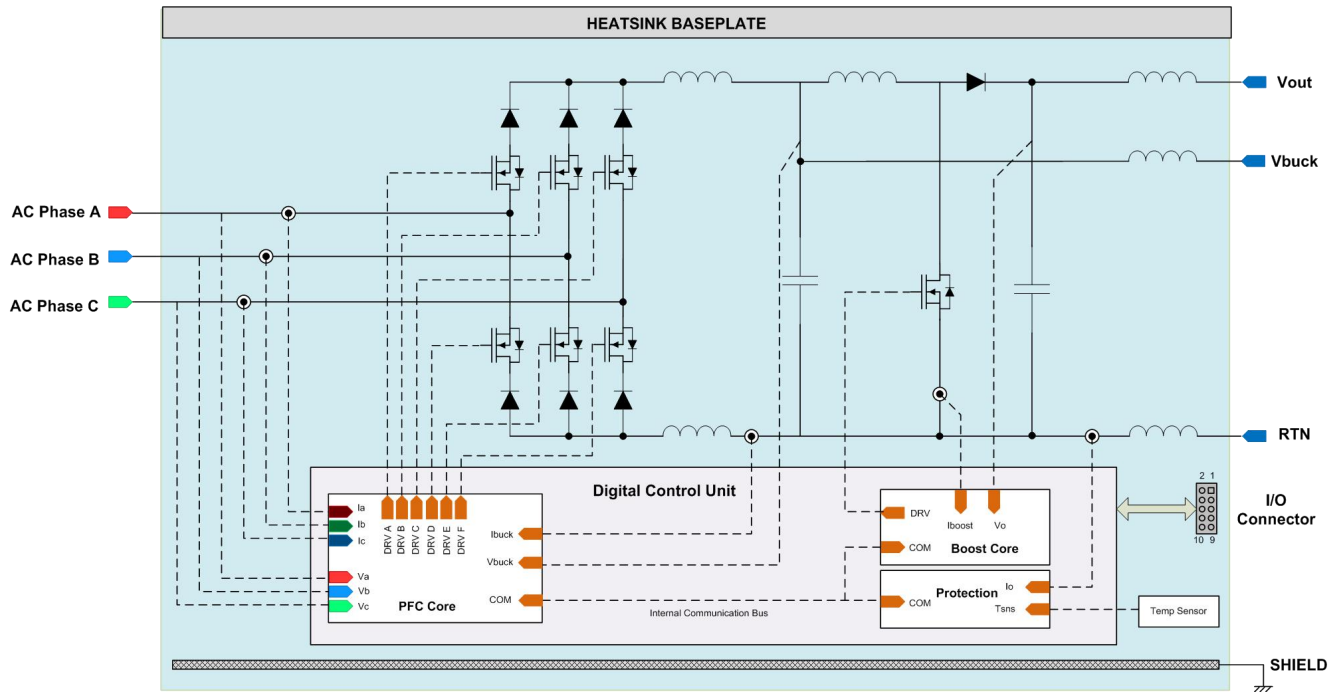


绝对最大值

以下是模块可以承受的最大应力，将模块工作在超出最大应力指标条件下会对模块造成永久损伤；将模块置于这些条件下，可能会损害模块的长期可靠性；将模块工作在最大应力指标范围以下但推荐工作条件范围以外，模块不能工作或可以工作但部分指标不能满足规格书要求。

Parameter		Symbol	Min	Max	Unit
输入电压		V_{IN}		575	$V_{pk\ L-L}$
控制信号 (A1~A10)			-2	7	V_{dc}
基板工作温度	s、m	T_a	-55	100	$^{\circ}C$
	i		-40	85	$^{\circ}C$
存储温度		T_{stg}	-65	135	$^{\circ}C$
信号引脚与基板之间		—	—	2150	V_{dc}
功率引脚与控制引脚之间		—	—	1000	V_{dc}

内部框图





电气特性(环境温度为 25℃)

除非特别注明，规格参数适用于全输入电压、阻性负载和温度条件

参数		符号	最小值	典型值	最大值	单位
工作输入电压		V _{IN}	85	115	140	V _{ac, L-N}
	启动电压			83	85	V _{ac, L-N}
	欠压保护		43	45		V _{ac, L-N}
	可承受的1S瞬态值				180	V _{ac, L-N}
	输入过压保护值	OVP	485	500		V _{pk,L-L}
最大输入电流（每相）		I _{IN,max}			6	A _{dc}
工作电压输入频率		F _{req}	47		800	Hz
线阻抗不平衡范围	幅度				5	V _{rms, L-N}
	相位				5	deg
线不平衡告警和保护	幅度			37		V _{rms, L-N}
	相位			18		deg
功率因素（400Hz, 1.5KW）		PF	0.98			
输入电流总谐波失真（THD）（400Hz, 1.5KW）		THD		1.5	2.5	%
功率损耗（400Hz）	无负载				9	W
	待机				6	W
浪涌电流					1	A
开关频率		f _{sw}	—	200	—	kHz
基板最高温度	s、m				100	°C
	i				85	°C
过温保护（s、m）	关机			125		°C
	恢复			110		°C
过温保护（i）	关机			100		°C
	恢复			85		°C
低温保护（只对“i”档有效）	关机			-45		°C
	恢复			-40		°C
V _{out} 特性						
输出电压设置值（输入115V _{rms} , L-N, 400Hz, 空载, 25°C基板温度）		V _{O, set}	272	275	278	V _{dc}
输出电压下垂特性				3		V/A
额定输出条件下的输出纹波（额定输入、输出负载从最小到最大）						
有效值（带宽5Hz~20MHz）			—	—	0.9	V _{rms}
峰峰值（带宽5Hz~20MHz）			—	—	1.8	V _{pk-pk}
外部电容推荐值*		C _{ext}	15	—	1000	μF
输入开机延时（交流输入起至10%额定输出）				360		mS
使能开机延时（使能有效起至10%额定输出）				230		mS
输出上升时间				230		mS
输出启动过冲				1		%
输出过压保护值			300	310	320	V
效率（400Hz）	全载			94.5		%
	半载			94.7		
BUCK输出特性						
BUCK输出电压设置值 （输入100~180V _{rms} , L-N, 400Hz, 负载从空载到满载, 基板温度-55~100°C）		V _{O, set}	170	200	230	V _{dc}
BUCK输出电压设置值 （输入85~100V _{rms} ,L-N, 400Hz, 负载从空载到满载, 基板温度-55~100°C）		V _{O, set}	145		230	V _{dc}
Buck额定输出条件下的输出纹波（额定输入、输出负载从最小到最大）						
有效值（带宽5Hz~20MHz）			—	—	2.2	V _{rms}
峰峰值（带宽5Hz~20MHz）			—	—	4.4	V _{pk-pk}
外部电容推荐值*		C _{ext}	40	100	1000	μF
BUCK限流值			9.5	10	10.5	A
输出过压保护值			300	310	320	V
效率（400Hz）	全载			95.4		%
	半载			95.7		

*备注:

如果需要更大的掉电维持电容，请采用电阻和二极管并联电路构成慢充快放回路，否则启动时可能触发过流保护。

注意: 模块内没有安装保险丝，使用时在输入线上加装保险丝。

此模块可以使用在各种应用中，包括单机应用，或者集成在一个复杂系统的电源架构中。为了保持最大的应用灵活性，模块内部没有安装保险丝。为了保证最大的安全性和系统得到有效保护，请在每一相输入线上加装保险丝。安规机构会要求三个输入线、不接地的端子上使用一个延时型或者快熔型 10A 规格的保险丝（具体参见安规特性章节）。根据本手册所提供的浪涌能量和最大电流信息，可以使用同样类型但是规格更低的保险丝。更多信息参考保险丝供应商数据手册。

绝缘规格

参数	符号	最小值	典型值	最大值	单位
任意引脚和基板之间的绝缘电压（基本绝缘）				2150	V
引脚2~9和基板之间的绝缘电容	C _{iso, BP}	—	2.2	—	nF
引脚2~9和信号引脚（A1~A10）之间的绝缘电压（功能绝缘）				1000	V
引脚2~9和信号引脚（A1~A10）之间的绝缘电容	C _{iso, sig}	—	1	—	nF
绝缘电阻	R _{iso}	10	—	—	MΩ

通用规格

参数	符号	最小值	典型值	最大值	单位
根据MIL-HDBK-217F计算所得的可靠性数据	MTBF	TBD			Hours
重量			325		g

功能特性规格

除非特别注明，规格参数适用于全输入电压、阻性负载和温度条件。更多信息参见特性描述章节。

参数	符号	最小值	典型值	最大值	单位
开机同步 START SYNC，高电平有效 允许同步启动 不允许同步启动 内部上拉电阻 内部上拉电压		2.4 — — —	— — 10 3.3	— 0.8 — —	V V kΩ V
异步收发器发送 UART TX 逻辑高电平 逻辑低电平		2.9 —	— —	— 0.4	V V
异步收发器接受 UART RX 逻辑高电平 逻辑低电平 内部上拉电阻 内部上拉电压		2.4 — — —	— — 10 3.3	— 0.8 — —	V V kΩ V
AC OK，高有效 AC输入低阈值 AC输入高阈值 阈值回差 输入频率低阈值 输入频率高阈值 逻辑低电平 内部上拉电阻 内部上拉电压		76 142 — 43 860 — — —	80 150 1 45 900 — 10 3.3	84 158 — 47 940 0.4 — —	V _{rms, L-N} V _{rms, L-N} V _{rms, L-N} Hz Hz V kΩ V
DC OK，高电平有效 直流输出正常阈值 直流输出欠压阈值 逻辑电平低 内部上拉电阻 内部上拉电压		— — — — —	240 140 — 10 3.3	— — 0.4 — —	V _{rms, L-N} V _{rms, L-N} V _{rms, L-N} kΩ V
PFC开启EN，低电平有效 逻辑高电平 逻辑低电平 内部上拉电阻 内部上拉电压		2.4 — — —	— — 10 3.3	— 0.8 — —	V V kΩ V
保护功能屏蔽PD，低电平有效 逻辑高电平 逻辑低电平 内部上拉电阻 内部上拉电压		2.4 — — —	— — 10 3.3	— 0.8 — —	V V kΩ V
AUX 输出电压范围 输出电流		3.19 —	3.3 —	3.43 100	V mA
频率同步输出 SYNC OUT 逻辑高电平 逻辑低电平		2.9 —	— —	— 0.4	V V

功率拓扑概述

如内部框图所示，本三相 PFC 整流器模块在 Line A/B/C 输入端接入标称 115 Vrms (L-N) /199Vrms (L-L) 的三相三线交流电源，模块内部采用有源 PFC 降压转换器，在 V_{BUCK} 引脚产生可控的直流输出。本有源 PFC 降压转换器方案为真正的三相整流器拓扑结构，而非三个单相整流器组合。有源降压型 PFC 转换器后级级联升压变换器，将 V_{BUCK} 电压升压至 $+V_{OUT}$ 的主输出电压。两个输出 (V_{BUCK} 和 $+V_{OUT}$) 都以 RTN 引脚为参考，并且与输入端线电压不隔离。

尽管在本文中使用了术语“(L-N) 相电压”，该转换器并未使用中线；因此如果实际应用中采用了存在中线的三相四线供电方式，其中线不能与本三相 PFC 整流器模块的输入端相连。

电气性能

效率和功耗

本三相 PFC 整流器模块可以从 V_{BUCK} 端或 $+V_{OUT}$ 端输出功率。从 V_{BUCK} 输出功率可避免后级升压变换器的损耗，从而提高效率。但尽管在效率上有一定的损耗，基于以下原因仍然推荐从 $+V_{OUT}$ 端输出功率：

$+V_{OUT}$ 输出端调整率更优；

在 V_{BUCK} 端存在保持电容时，如图 15 和图 17， $+V_{OUT}$ 端具备更好的掉电维持功能，即在输入电压中断期间也可以保持正常的输出电压。

本三相 PFC 整流器模块的效率如图 1 所示，图 2 为对应的功耗。

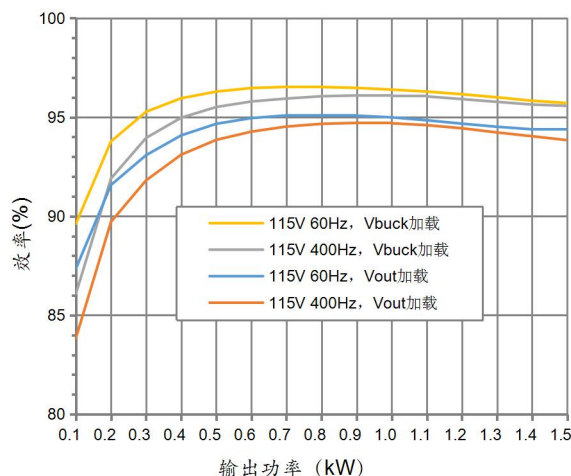


图 1：效率 vs. 输出功率曲线（30°C 基板温度）

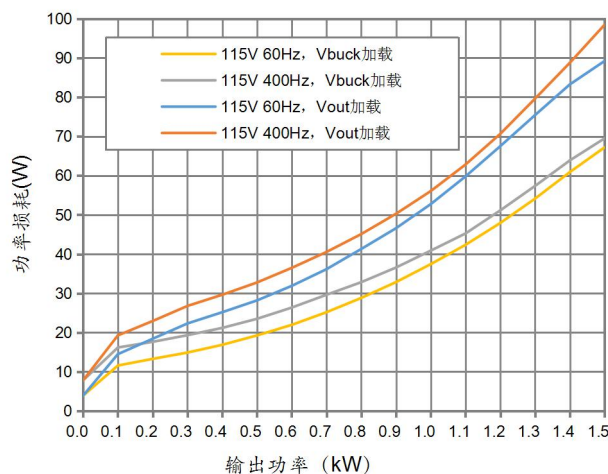


图 2：功率损耗 vs. 输出功率曲线（30°C 基板温度）

输入电流失真度

传统的二极管整流器解决方案通常使用较大的磁性器件，并且谐波失真相对较高。相比之下，本三相 PFC 整流器模块开关频率高，采用小而轻的内部磁性元件即可保证非常低的失真。即使三相输入电压存在一定的相位和/或幅度不平衡，本三相 PFC 整流器模块因采用主动功率因数校正技术同样能降低谐波含量、保证较好的平衡相电流。

由于有源 PFC 降压转换器在轻载时的不连续工作模式，轻载时本三相 PFC 整流器模块输入电流谐波含量 (THD) 轻微增加；当输出功率达到满功率的 25% 以上后，本模块输入电流 THD 表现较为理想，详见图 3。输入电流 THD 将随着输入电压 THD 的增加而增加，从 V_{BUCK} 或 $+V_{OUT}$ 端输出功率模块的输入电流 THD 表现相似。

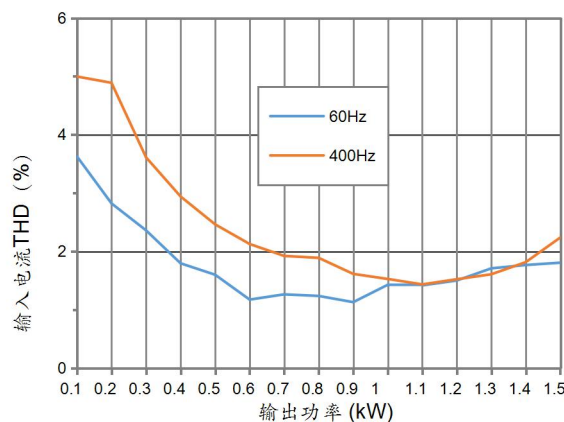


图 3：输入电流 THD vs. 输出功率（输入电压 115V L-N）

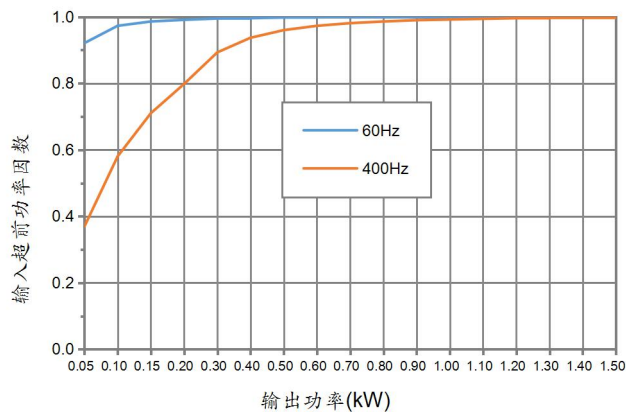


图 4：输入超前功率因数 vs. 输出功率（输入电压 115V L-N）

基波无功功率

本三相 PFC 整流器模块需配合外部滤波模块 UFLT-3PAW-AA-HM 使用，因此在考虑总无功功率时应综合考虑模块内部输入端线间电容与外部滤波器模块线间电容。在 400Hz 运行时，包括外部输入滤波器模块的总无功功率每相约为 100Var。这可以直接在图 5 中观察到，其中，在半载 400Hz 运行时，输入电流相位超前 20 度输入电压。在满载 400Hz 运行时，输入电流的相位比输入电压相位超前 10 度。在 60Hz 时，无功功率几乎低 7 倍，所以输入电流相位超前较小：半载时超前 3 度，满载时超前 1.5 度。图 4 为输出功率与主要功率因数的函数曲线。

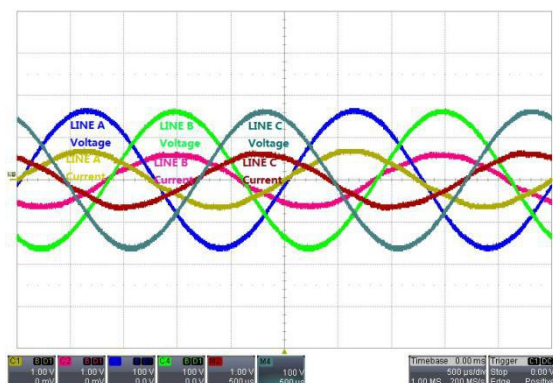


图 5: 满载条件下输入频率为 400Hz 下典型输入电流波形



图 6: 满载情况下启机波形: V_{BUCK} (CH1), V_{OUT} (CH2);
 V_{BUCK} 并联 1mF 电容, V_{OUT} 并联 68uF 电容

电源电路概述

浪涌和启动

由于主开关管前只需少量的 EMI 电容，本三相 PFC 整流器模块采用的 PFC 降压拓扑结构可以很好地控制模块的启动浪涌电流。由于采用了恒流控制，即使在 V_{BUCK} 和/或 $+V_{OUT}$ 端存在很大的掉电维持电容、满载启动，PFC 降压环节也能很好地控制启动电流并对电容进行有序充电。

模块只有在 AC OK 信号为高电平后，才会启动。当满足以下三个条件时，设备将开启，启动波形参见图 6。

- 1) EN 引脚被拉低
- 2) 输入相电压为 85Vrms (L-N) ~ 140Vrms (L-N)
- 3) 输入频率为 47Hz ~ 800Hz

线路瞬态电脉冲

本三相 PFC 整流器模块采用的 PFC 降压级在器件选型时留有较大的设计裕量，能承受较大的输入瞬态浪涌电压，当超出典型的工作输入电压范围的瞬时高电压施加在本模块时，模块不会损坏且仍能正常工作、输出电压正常。

线频率和相位旋转

本三相 PFC 整流器模块未采用内部锁相环，因而可在 47 ~ 800 Hz 工作频率范围内实现无缝快速的输入频率瞬变。

输入电压无论是 ABC 还是 CBA 输入电压相位旋转，本三相 PFC 整流器模块均可正常工作。

共模电压

$+V_{OUT}$ 和 V_{BUCK} 输出共用一个功率回线 RTN，并且这三个引脚相对于三相线电压输入都是非隔离的。以三相输入电压的瞬时平均值（中点电压）为参考点测量，RTN 端电压存在一个 3 倍于输入电压频率、约 60Vpk-pk（在标称线路电压下）的共模纹波电压，如图 7 所示。其中每个信号均以中点电压为参考的差分探头进行测量。由于此纹波为共模纹波，在应用中不会对应用中任何功能电路造成影响，因为在实际应用中交流输入不会以输出为参考。此外， V_{BUCK} 输出和 RTN 是关于三相输入中点对称的。

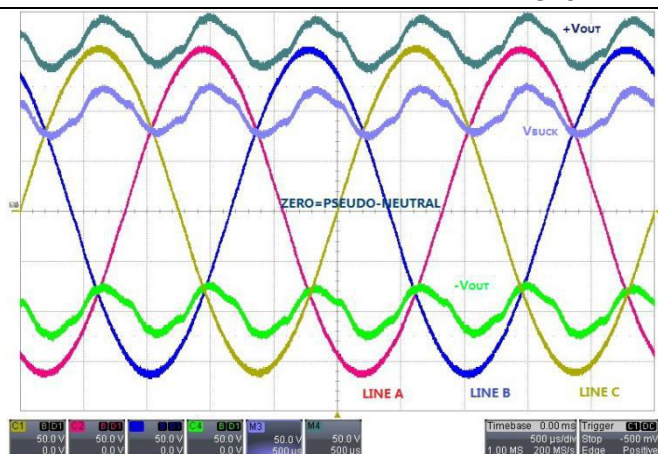


图 7: +V_{OUT} & V_{BUCK} & RTN 对输入中点(NEUTRAL)的共模电压波形

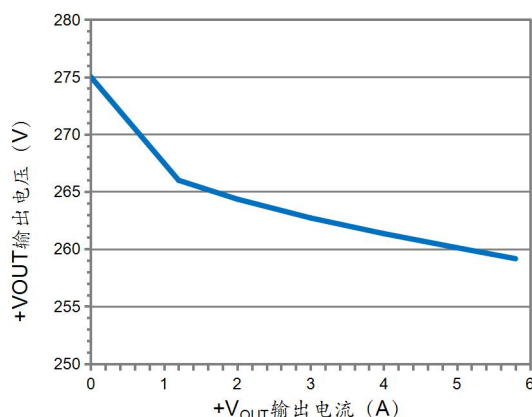


图 8: +V_{OUT} 输出电压 vs 输出电流

V_{BUCK} 调节与线电压

作为降压转换器, PFC 整流器只能产生比输入线电压低的 V_{BUCK} 输出。模块的 V_{BUCK} 输出在较高的输入电压下保持不变, 即标称的 200V; 但当交流输入电压低于 100Vrms (L-N) 时会降低 (参见图 10)。

+ V_{OUT} 调整率和电压随输出电流下降特性

模块内后级级联的升压变换器补偿了 V_{BUCK} 的变化。升压变换器的最大占空比为 50%, 因此只要 V_{BUCK} 输出电压大于额定 +V_{OUT} 输出电压的一半, 就能够维持额定的 +V_{OUT}。

由后级级联的升压变换器产生的 +V_{OUT} 输出电压在空载时稳定在 270V, 但随着负载电流的增加 +V_{OUT} 输出电压下降 (见图 8)。这种电压下降的特性符合 MIL-STD-704 标准规定的标称 270Vdc 直流电压总线的 250V 至 280V 正常电压范围。这种电压下降的特性具备两个优势:

- 如果 +V_{OUT} 的输入端是以恒定功率进行供电的, 则电压下降意味着额外的输出阻抗, 从而提高下游转换器的输入系统稳定性。
- 电压下降特性改善了 +V_{OUT} 的动态响应的峰值偏差。负载瞬变造成的峰值偏差与负载瞬变前的电压相关: 如果标称输出电压由于满载而开始下降, 则负载去除时产生的峰值偏差也会降低。

+V_{OUT} 输出电压的下降特性与温度有关: 当设备发热时, 同样的负载下, +V_{OUT} 输出电压会稍低一些。

并联指南

本三相 PFC 整流器模块 (即 EPFC-3PAW-1K5-270-FP) 内置多个控制特性以便于并联。多达 10 个单元模块可以直接并联使用; 若应用中模块后级采用高压直流变换器对各三相 PFC 整流器模块输出进行隔离, 可实现 10 个以上单元并联使用。直接并联的典型应用原理图见图 9。采用图 8 所示的输出电压下降特性实现模块均流, 机制简单, 无主/从分布式均流, 不涉及单元之间的通信。

反向电流

由于本三相 PFC 整流器模块的每个输入整流桥臂由开关管与高压二极管串联构成, 故降压 PFC 整流器本身只能正向输送功率。使用高压二极管的后级升压变换器也是如此。因此, 电流不能从一个单元的输出倒流到另一个单元的输出。

均流精度

本三相 PFC 整流器模块的输出电压随输出电流的增加而下降, 即输出电压为输出电流的函数, 如图 8 所示。输出电压的精度及电压下降特性的函数在生产过程中已进行了校准, 以最大限度地减少模块之间的差异。此校准过程可实现良好的均流精度: 各模块单元的输出功率通常与平均功率的偏差在 ±50W 以内。外部输出接线阻抗应在各模块单元之间进行优化匹配以实现最佳均流性能。

三相 PFC 整流器模块可选功能

三相 PFC 整流器模块包含同步启动脚 A1: START SYNC 用于与并联相关的功能:

在多个单元模块并联时, 如因保护使模块进入打嗝模式之后, START SYNC 总线会主动让各个单元模块同时重启。例如, 当模块工作在高温、满载条件下, 一个或多个单元模块可能出现过温保护, 并由此导致其余单元模块过流, 并导致模块由于 V_{BUCK} 欠压关断, 50ms 之后进入打嗝状态。当这些并联模块试图重新启动时, 由于部分单元模块因过温保护仍然被强制关闭, 而其它模块因不能支持满载从而无法启动。当所有模块冷却到可以重新启动时, 因所有模块的打嗝间隔不同步, 系统仍然处于无法启动状态。当将并联各模块的 START SYNC 脚相连可以延迟各模块的重启, 因为直到并联模块都脱离打嗝模式、才能同时启动。

并联时的控制信号的连接

并联系统的以下控制信号接线方式建议采用如下典型应用图 (图 9) 中获得:

- 多个单元的 GND 引脚应连接在一起以提供一个公共控制地。
- RX 和 EN 输入引脚可以并联连接。
- AC OK 和 DC OK 输出引脚可以并联连接。
- 各模块的 START SYNC 管脚应该并联在一起。
- AUX 输出也可以并联, 但从 AUX 获取的总电流不应超过单个设备的额定值。

- 6) SYNC OUT 引脚各单元之间不要并联，不然会导致逻辑输出竞争。
- 7) 串行输出信号可以使用外部与门组合。这样可以通过在 TX 为低电平时将总线拉低来形成多点总线，并在 TX 为高电平时释放总线，并通过上拉电阻使总线返回空闲状态。该上拉电阻的时间常数以及寄生电容必须比波特率短得多。
- 8) PD 引脚不应该在单元之间互连，如果不使用 PD 引脚，则可以保持开路。

电源并联连接

并联电源系统的接线方式可以参考图 9 的典型应用图：

- 1) $+V_{OUT}$ 和 RTN 可以直接并联连接。
- 2) 线路输入 A/B/C 应并联在输入滤波器的上游。每个 PFC 模块应该在输入引脚附近有各自的 TVS 管。
- 3) 不能将不同模块的 V_{BUCK} 直接并联。通过用多个 R||D 元件（从图 18）连接到图 9 所示的配置，这样 V_{BUCK} 共用一个保持电容器是可行的。在每个模块的 V_{BUCK} 附近放置一个推荐值的电容。

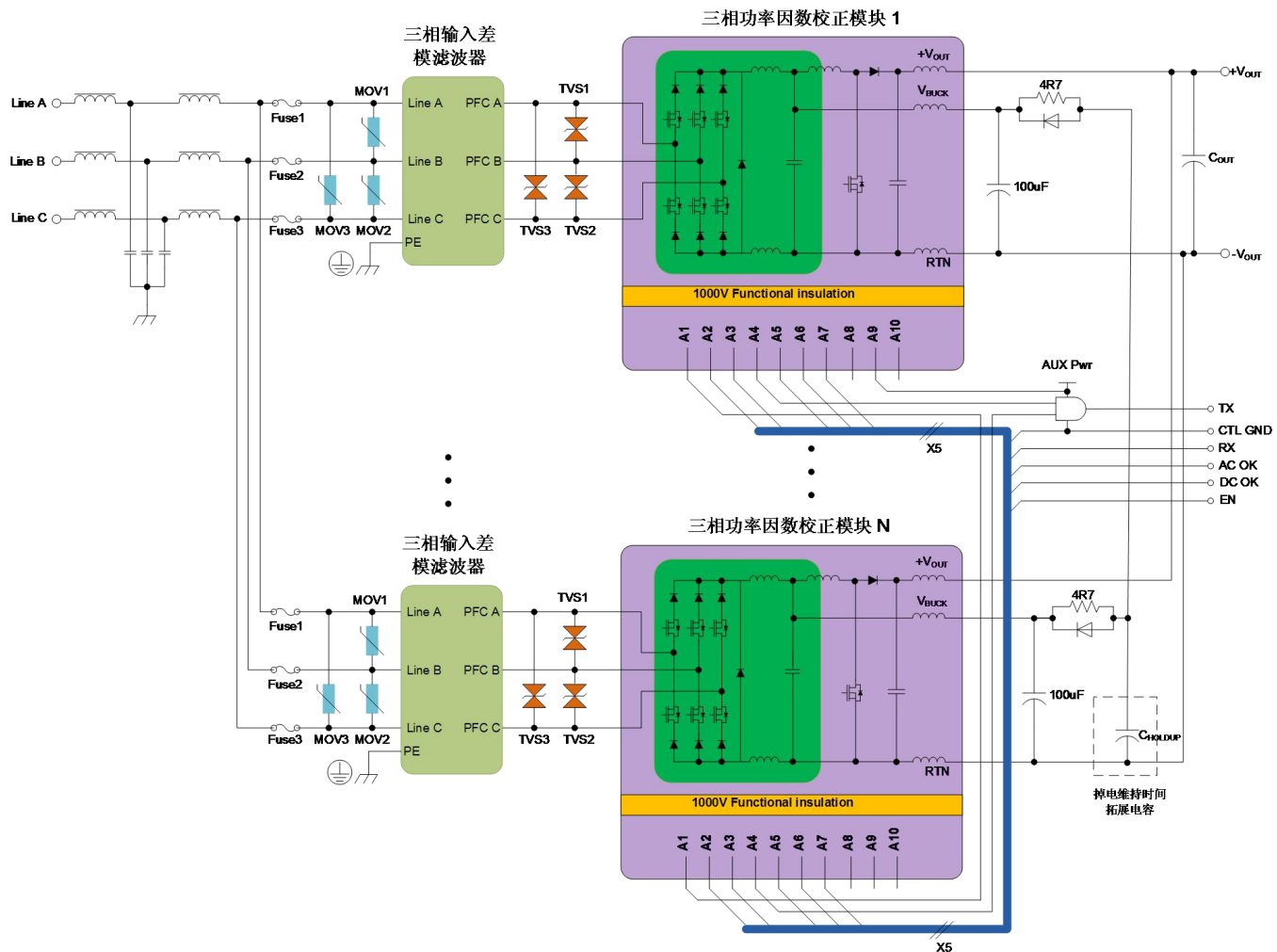


图 9：多模块并联使用原理图

并联输入滤波器设计

三相交流模块并联应用的输入滤波器设计有两种可供选择：非直接并联应用采用半砖，直接并联应用采用四分之一砖。半砖 UFLT-3PAW-AA-HM 模块在一个模块中集成了共模（CM）和差模（DM）滤波器。半砖式滤波器可以与单个 PFC 单元配对使用，也可以用于每个 PFC 模块输出被隔离后再并联的应用中。当把多个 PFC 模块直接并联使用时，不能将多个 CM 输入滤波器并联使用，因为通过它们的网络电流不会平衡到零。这会导致 CM 磁芯饱和，从而损坏 CM 滤波器的性能。作为替代方案，在直接并联应用中，推荐使用四分之一砖 UFLT-3PAW-BA-QM 滤波器模块，该模块仅实现差分模式（DM）滤波。如图 9 所示，这些 DM 滤波器与一个上游外部 CM 输入滤波器配合使用。由于只有一个返回路径，所以通过单个 CM 的净电流保证为零。共模（CM）扼流器元件的参数设计非常关键，因为任何杂散外部磁感应电流都将被直接耦合到上游输入电源电缆。输入三线并绕（把输入的三相线作为一个绕线单元来处理）对于良好的 CM 滤波性能至关重要。每层绕组入线端和出线端不交叠：当使用多个平行绕组层来减少阻性损耗时，每层匝数应一样。

额定功率

连续额定功率

输入电压高于 100Vrms (L-N) 时, 稳态输出功率额定值为 1500W, 此额定值是依据 (最小) 9.5A 电流限值提供的设计余量、基于 V_{BUCK} 输出 7.5A 而定出的。对于 200V 的 V_{BUCK} 电压, 7.5A 对应 1500W。当输入电压低于 100Vrms 时, 稳态 V_{BUCK} 电压降低, 额定功率也会按比例降低; 85Vrms 时 V_{BUCK} 通常为 170V, 相应的额定功率为 1275W (见图 10)。

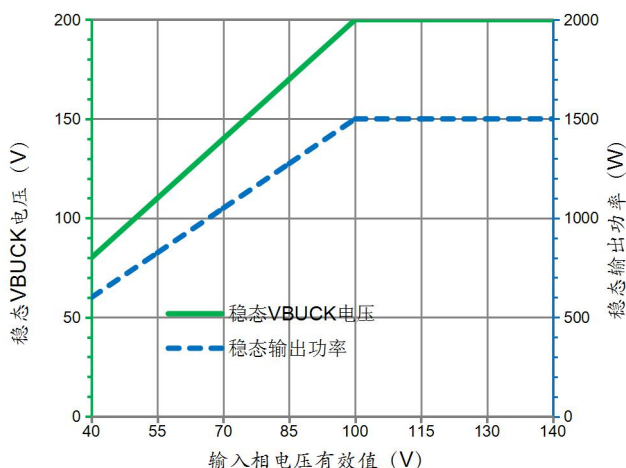


图 10: 稳态情况下 V_{BUCK} 电压和输出功率随输入相电压有效值变化曲线

热管理

通过采用先进的热管理技术, 从功率器件到基板的热阻非常低。在 1.5 kW 负载下, 内部功率器件比基板温度高约 20°C。这使得即使在 100°C 的基板温度下也能满功率输出 (参见图 12)。

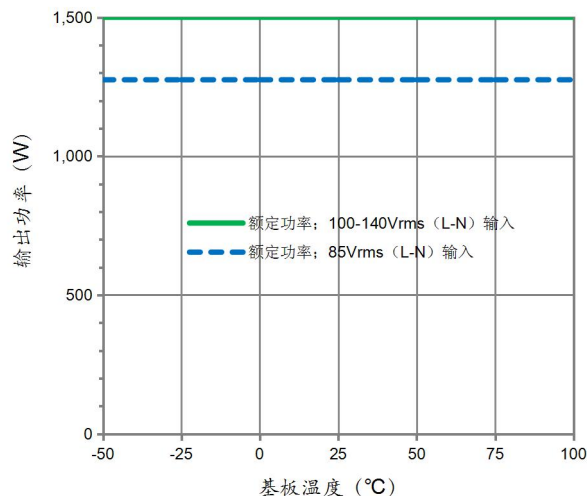


图 12: 稳态情况输出功率随基板温度变化曲线

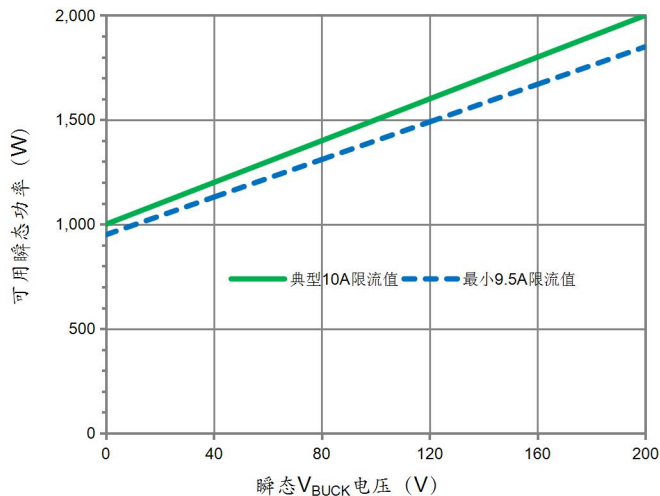


图 13: 瞬态可用功率与瞬态 V_{BUCK} 电压关系 (静态参数参见图 10)

V_{BUCK} 电流限制

降压级输出电流限值为 $10\text{A} \pm 5\%$ 。由于 V_{BUCK} 在低输入电压下降低, 对应的输出功率也会降低 (参见图 10)。从热性能上讲, 只要维持基板温度等于或低于 85°C, 同时保持内部温度低于 125°C, 模块是可以临近电流限值持续工作。因为 $+V_{\text{OUT}}$ 为稳压输出, 所以升压级是恒功率输入: 如果 V_{BUCK} 电压下降, 升压级输入电流将升高。因此如果模块从 $+V_{\text{OUT}}$ 加载, 就会激活降压级 10A 电流限值, V_{BUCK} 电压的跌落受 V_{BUCK} 电容容量大小控制。为此建议稳态情况下模块工作在等于或低于额定功率下, 仅在瞬变状态下接近电流限值。

电流限值采用线性而不是折返的控制方式。在许多情况下, 模块可以在瞬间达到电流限值、并在不关机的情况下恢复。要确定模块遇到的是输入还只是负载瞬变:

- 1) 首先确定瞬变过程中最小 V_{BUCK} 电压, 通常会低于图 10 所示的稳态值。最小 V_{BUCK} 电压值是瞬变严重程度和 V_{BUCK} 电容值的函数: 对于负载瞬变, 如图 14 中所示, 但必须针对输入瞬变进行实测。
- 2) 将此最小 V_{BUCK} 电压乘以 9.5 A (最差情况时 V_{BUCK} 电流限值的最小值), 以获得瞬变期间可用功率的最小值 (见图 13)。
- 3) 如果此最小可用功率大于瞬变期间施加的负载功率, 则该模块将在瞬变后恢复。如果在瞬变过程中负载功率高于可用功率, 则 V_{BUCK} 电压将崩溃。当 V_{BUCK} 电压低于 50V、并持续 150ms 时, 模块将关闭, 并在 1S 后自动重新启动。

负载瞬变影响

在+V_{OUT}或V_{BUCK}上施加的瞬变负载将导致V_{BUCK}上的电压显著跌落,为保证持续功率输出应必须如图13所示保持V_{BUCK}电压足够高。正如图14所示V_{BUCK}外部电容越大,电压瞬间跌落幅度越小。

例如,用一个100μF电容放置到V_{BUCK}端,可以处理从0%至75%额定功率的变化:如图13所示,维持75%功率所需的V_{BUCK}电压仅为120V。但是从0%至100%的负载瞬变需要至少180μF的外部电容,以保持V_{BUCK}不会低于所需的160V。有关更多信息,请参见上文标题为“V_{BUCK}电流限值”的部分。

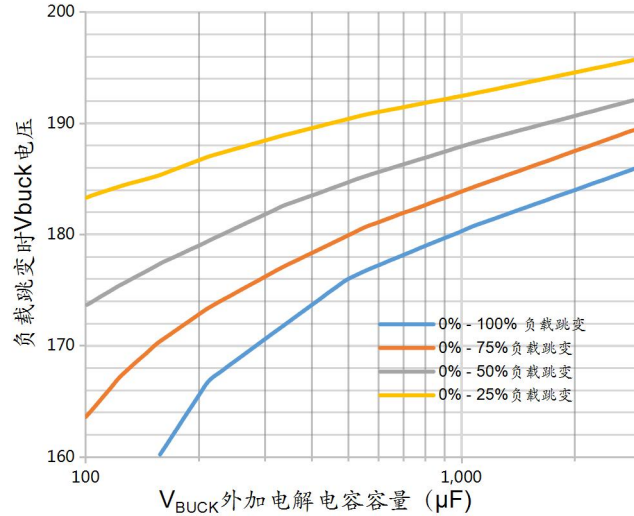


图 14: 不同负载跳变幅度情况下 V_{BUCK} 电压瞬间电压值与其端口电容量之间的关系

电源中断和保持

很多系统都要求当输入电源瞬间中断时,仍可以正常工作。V_{BUCK}外部电容、+V_{OUT}外部电容或者说两者所有的外部电容都可用于在输入电源中断期间维持关键负载的电力。

保持电容器的位置

当大容量保持电容器位于V_{BUCK}端口时,电容器电压可能在输入电压跌落期间下降,而+V_{OUT}电压则保持相对不受干扰。升压级能够将其输出保持正常即使V_{BUCK}电压下降到+135V。V_{BUCK}上电容器的额定电压应至少为240Vdc。

如果在输入电压中断期间可以接受输出电压的下降,则可以将保持电容置于+V_{OUT}端口。在输入掉电期间,降压PFC级中的二极管保持反向偏置,直至V_{BUCK}电压降至图10所示的电压值以下。在V_{BUCK}端口采用相对较小容量可使V_{BUCK}快速下降至此电压值,从而允许转换器为+V_{OUT}补充功率(参见图13)。+V_{OUT}电容器的电压额定值至少应为320Vdc。

内部偏置电源既可以通过输入也可以通过+V_{OUT}供电。如果发生输入电压中断,只要+V_{OUT}保持在115Vdc以上,模块将保持在工作状态。升压级包含一个旁路二极管,因此+V_{OUT}至少会比V_{BUCK}高出一个二极管压降的电压。

保持电容的容值

保持电容器必须存储一定量的能量,公式如下:

$$E_{\text{holdup}} = P_{\text{out}} * t_{\text{drop}}$$

其中:

P_{OUT} 是保持期间的输出功率

t_{drop} 是输入电源中断的持续时间

基于这种能量要求,保持电容值为:

$$C_{\text{holdup}} > \frac{2 * E_{\text{holdup}}}{(V_i^2 - V_f^2)}$$

其中:

V_i 是输入电源中断前的初始保持电容器电压。

V_f 是瞬变期间的最小电容器电压。(对于V_{BUCK}的电容,从图13中确定;对于+V_{OUT}电容,根据下游电压要求确定。)

上述公式,可以绘制成图15中的V_{BUCK}折线图 and 图16的+V_{OUT}折线图。

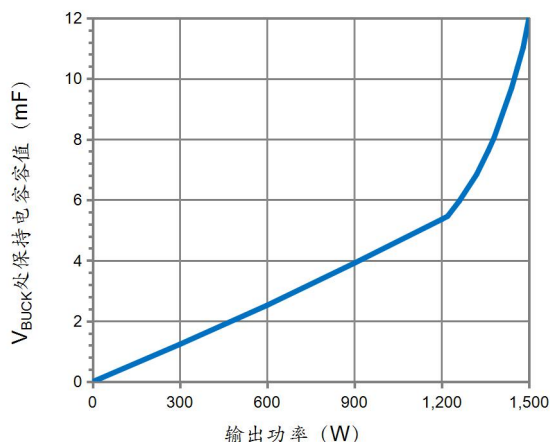


图 15: 输入 50mS 输入中断条件下（参见图 17）、保持 +VOUT 在调整范围内所需要的 V_{BUCK} 端口保持电容容量。电容耐压必须不低于 240V。

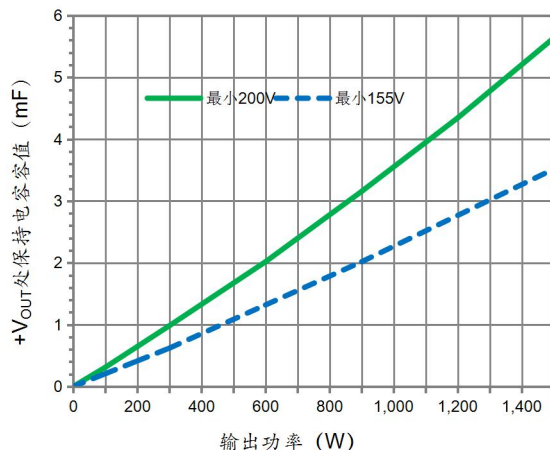


图 16: 保证 50mS 输入中断条件下（参见图 17）、允许 +VOUT 下降到 200V 或者 155V，+VOUT 端口所需的保持电容容量。电容耐压必须不低于 320V。

当保持电容位于 V_{BUCK} 时， V_i 将是线电压（见图 10）和负载电流（ V_{BUCK} 在满载时通常会下降到 200V）的函数。由于 V_{BUCK} 有电流限制， V_f 将成为线路中断期间负载功率的函数（参见图 13 以及标题为“ V_{BUCK} 电流限制”的章节中的进一步讨论）。

如果系统在输入中断期间能容忍大的电压跌落，则保持电容也可以被置于 +VOUT 端。可用能量可以从 +VOUT 电容中提取，因为它从 270V 放电，从而降低必要的电容物理体积，但是可能需要通过在 V_{BUCK} 处加大电容容量来实现图 17 所示的 +VOUT 响应。

由于各环节参数的累积效应，建议使用具有一定安全裕度的保持电容：

- 1) 电容容差，老化及温度变化
- 2) 中断期间的电容器 ESR 和二极管损耗
- 3) 由于输入电源中断之前的线路和负载条件引起的初始电压 V_i 的变化
- 4) 电流限制容差（最小 9.5A，如图 13 所示，提高所需 V_f 以保持负载功率）
- 5) 升压级效率（见图 2：满载时为 98.5%）
- 6) 输入电压的上升和下降时间，这会增加 PFC 无法向 V_{BUCK} 输送电力的时间间隔

图 17 出示了一个 50mS 线路中断的例子。请注意，对于图 17 中的条件，公式可预测 $C_{holdup} > 6mF$ 。实际使用的电容为 7.5 mF，选择该电容以使最小电压远高于图 13 中显示的可用瞬变功率，并考虑到了上面讨论的第 1、2、5 和 6 项的组合效应。

当长时间输入电源中断期间想获取满载时，保持电容的物理尺寸会变得非常大，可能已无法找到合适电容了。此外，重复的瞬变在恢复时间内需要多余的能量。当 AC OK 信号变低时，可以通过禁用非关键负载来显著降低保持功率。

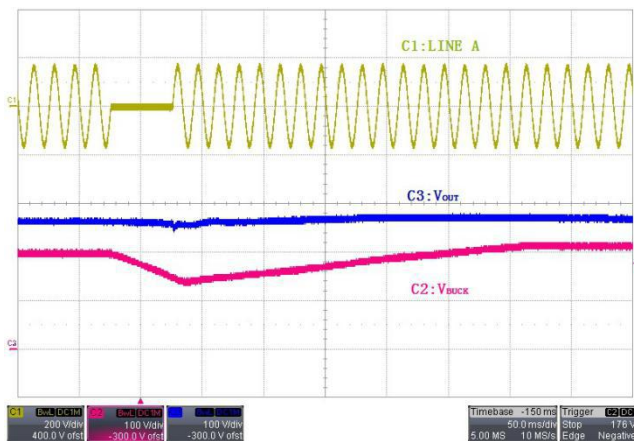


图 17: 输入 50mS 掉电响应。条件为 60Hz、+VOUT 带载 1250W，在 V_{BUCK} 端口有 7.5mF 电容，采用如图 18 所示的 R||D 网络。

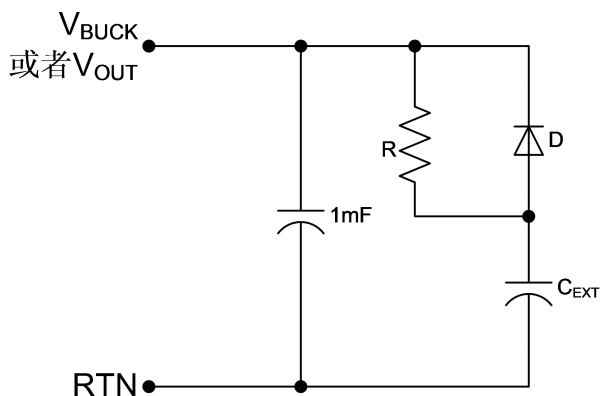


图 18: 当输出端电容超过 1mF 时的慢充快放电路
R: 4.7Ω; D: 300V 快恢复二极管

在交流相电期间保持

当考虑从输入跌落/低电压恢复时，必须将上述 C_{holdup} 公式中的 t_{drop} 定义为 PFC 无法给 V_{BUCK} 充电的时间。当 V_{BUCK} 高于图 10 所示的标称值时，PFC 将无法提供任何电源，因为降压拓扑 PFC 级中的二极管处于反向偏置从而不会有电流流过。因此，在输入低电压期间， V_{BUCK} 电容将需要提供整个负载需求，直到 V_{BUCK} 电压放电至低于图 10 所示值之后，此后降压 PFC 可提供高达 10 A（典型值）/ 9.5 A（最小值）电流到 V_{BUCK} 。

如果 V_{BUCK} 的功率需求低于图 10 所示的可用功率，则可以通过扩展低电压运行来提供。如果所需功率超过此可用功率，则超出部分功率必须来自 V_{BUCK} 电容，并且 V_{BUCK} 电压将会与超出部分功率成正比例的速率降低（与 V_{BUCK} 电容容值成反比）。即使因输入电压低于 80Vrms 之后 AC OK

信号被拉低，模块也可以以降低的功率持续工作直到输入电压下降到 40Vrms（输入 UVLO 阈值）。同样在 140Vrms 以上的输入电压浪涌期间，模块也将持续运行。在初始启动时输入电压必须保证在 AC OK 阈值内。

在交流线浪涌期间的保持

在某些情况下，较大的交流相电瞬变可能会触发“短路电流限制”或“输入过电压保护”。对此的响应，模块将分别中断 240μs 或 1mS 的电源供应。这应该被视为输入电压中断；对于此种瞬变，通常需要大量的外部保持电容来保持输出电压在调节范围内。请参阅上文标题为“保持电容容值”的章节以进一步分析。

用于大容量电容器的 R || D 网络

超过 1mF 最大值的电容需要额外的串联 R || D 网络以获得最佳稳定性，如图 18 所示。二极管的额定电压必须至少为 300V，建议使用快速恢复类型以提高正向恢复特性。该电阻必须具有足够的脉冲功率能力。

对于 1mF 和 10mF 之间的电容，电阻值应为图 18 中显示的 4.7Ω。此电路也可以使用在容量大于 10mF 场合，但如果 V_{BUCK} 在开始上升后的 150mS 内未达到 50V，则可能会触发“V_{BUCK} 欠压关断”保护。将电阻值增加到 10Ω 可以规避此保护、V_{BUCK} 电压会快速上升到 50 V 以上（实际上这是电流限值在电阻上形成的压降）。但是 10Ω 值会增加电容充电时间，从而影响重复动态响应的能力。

脉冲负载和输入谐波

图 19 所示的 CE101 输入谐波测试是采用直流负载下进行测量的结果。如果被测系统是脉冲负载，则脉冲功率可能会反射回输入端，并可能导致不满足限值要求。PFC 中的特殊恒功率控制能够提供有效帮助。

恒定输入功率控制的条件

三相 PFC 有两种控制模式。在 V_{BUCK} 标称设定点的 ±10V 范围内，降压级输出接近恒功率特性。如果 V_{BUCK} 容量足够大，这种特殊的控制方式会强制电容吸收（并传递）大部分负载脉冲能量，从而有助于防止负载变化出现在交流输入上。在 ±10V 恒定功率窗口内，平均功率输出以 40mS 的时间常数缓慢调整。

另一方面，如果脉冲负载过大或 V_{BUCK} 电容太小，V_{BUCK} 偏离额定值超过 ±10V，则控制器将切换模式并尝试快速调节 V_{BUCK} 电压。这必然会从交流输入中吸收瞬变电流。

实现恒定功率控制所需的最小 V_{BUCK} 电容容值的一般计算方法可以表示为：

$$C_{MB} = \frac{(P_{\max} - P_{av}) * D_{\max}}{f_{\text{tran}}} * \frac{1}{V_{MB} * \Delta V_{MB}}$$

或者

$$C_{MB} = \frac{(P_{av} - P_{\min}) * D_{\min}}{f_{\text{tran}}} * \frac{1}{V_{MB} * \Delta V_{MB}}$$

括号中的值来自上述示例：

v 是脉冲负载平均功率

max 是脉冲负载最大功率

min 是脉冲负载最小功率

max 是最大功率占空比

min 是最小功率占空比

tran 是脉冲负载频率

M_B 为 200 V，标称 V_{BUCK} 电压。

Δ M_B 为 12 V，对保持恒定功率控制所需的 20 V_{pk-pk} 最大 V_{BUCK} 电压偏差应用安全系数。

V_{BUCK} 电容不一定需要足够大以满足上述等式。在负载瞬变小或 AC 输入电流瞬变可接受的应用中，V_{BUCK} 可能使用较小的电容。

+V_{OUT} 电容

在 +V_{OUT} 的脉冲负载峰值功率高于 2kW 应用中，+V_{OUT} 端需要更多的电容。在这种情况下，加大 +V_{OUT} 电容容量到足够满足脉冲负载能量要求、且将升压级峰值功率降低到 2kW 以内。这可以防止激活升压级的逐周期电流限制。

+V_{OUT} 处的最小推荐电容随最大负载电流线性变化。如果最高预期负载电流为额定值的一半，则 +V_{OUT} 电容容量也可以减半。如果系统仅从 V_{BUCK} 抽取功率，则在 +V_{OUT} 端不需要外部电容。

下游功率转换器对稳定性电容有其自己要求。任何稳压电源转换器的输入均可能导致输入系统不稳定（请参阅“输入系统不稳定性”白皮书）。如果这个下游转换器的输入功率是恒定的，那么电压的增量下降将导致转换器吸收更多的电流。这可以建模为负阻（在 DC 频率直到转换器输入电压前馈控制带宽时有效）。结合一个电感源，这种负阻可能会引起较大的振荡，这很可能发生在最低电源电压和最高工作功率下。典型的解决方案是在任何下游功率转换器的输入端用串联一个足够大的电容器的方式添加一个已知的正电阻。由于稳定性将取决于下游转换器的设计和所选外部电容值/串联电阻，因此最好在最终应用中验证下游转换器的稳定性。

外部电容选择

在 V_{BUCK} 外部连接的电容器应具有 240V 或更高的额定值。对于 +V_{OUT}，额定值应至少为 320V。标准铝电解电容器是可以使用，但有几个明显的缺点：

- 1) 额定温度范围窄
- 2) 室温下 ESR 较高
- 3) 低温时 ESR 非常高
- 4) 高温下的可靠性差

聚合物固态电解电容器可以牺牲一些能量密度为代价来解决所有这四个问题：

- 1) 额定温度范围为 -55℃ 至 125℃

- 2) 室温下良好的ESR
- 3) 额定在低温下保持良好的ESR
- 4) 更好的可靠性

目前, 这些固体电解质电容器只有在额定电压值为80V及以下的连续直流才能广泛使用(例如, Nichicon PCR系列)。可用的评估板原理图显示了把这些电容串联在一起, 通过简单的分立电路实现各个电容器电压的平衡、从而达到更高的总额定值。

保护特性

过温关闭

当内部传感器温度升至125℃以上时, 集成温度传感器通过关闭模块来防止模块被意外损坏。内部传感器冷却到110℃以下后, 模块会自动重新启动。过热关机功能(以及缺相关机)可以通过将PD信号连接到CTL GND进行屏蔽。

在主过温关机功能被屏蔽的情况下, 一个由偏置电源IC提供的冗余保护将仍然保持有效。当此IC温度超过约160℃时, 同时关闭模块和AUX电源。在满载情况下, 这相当于基板温度约145℃。

缺相关机

在电源缺失一相输入的情况下, 模块将在延迟150mS后关闭, 并且在三相电源恢复正常约1S后自动重启。在电源缺失一相输入过程中, 模块将尝试从剩余的两相输入中传递能量。但是缺相关机功能(和过温关机功能)可以通过将PD信号外部连接到CTL GND被屏蔽。在这种情况下, 模块将尝试在整个缺相过程中传递能量。当没有被外部驱动拉低时, PD引脚上的高电平状态表明即将发生过温或缺相关机。

短路电流限制

在大多数过载情况下, 线性的10A降压级电流限制就足够了。备用“短路电流限制”电路用于处理严重的输入瞬变或输出短路事件。冗余电流检测电阻和比较器串联在降压PFC级的正负两侧, 动作阈值远高于线性电流限制阈值。当这个备用保护功能被激活时, 大约200μS内模块将通过关闭所有和输入相关的功率回路, 在此之后正常操作立即恢复。

输入过压保护

如果任何两相之间输入瞬时电压超过500V(L-L)的阈值, 则和输入相关的功率回路将被中断, 并在输入电压再次下降到相同阈值以下1mS后恢复。(短于80μS的电压尖峰可能不会触发该保护。)在中断期间, V_{BUCK}电压将以由电容和负载电流确定的速率下降。在此1mS中断期间维持正常工作所需的电容量可按照标题为“保持电容值”的部分进行计算。

输入欠压关闭

输入电压必须高于81Vrms(L-N)才能激活AC OK, 并允许模块启动。如果输入电压最终低于40Vrms(L-N)超过1S, 则模块将关闭并保持关闭状态至少1S。

升压电流限制

独立的电流检测电阻和比较器在升压级实现硬件方式的逐周期电流限制, 设置的升压输入电流限值大约为14A。升压级与降压级相串联, 降压电流限值设置为10A, 因此升压电流限值仅在异常情况下才有效。内部在V_{BUCK}和+V_{OUT}之间有一个旁路二极管连接, 以提供进一步的短路保护。

输出过压保护

如果+V_{OUT}超过300V, 冗余的硬件过压保护电路将以逐周期方式关闭升压级。输出电压恢复到低于此阈值后设备将立即恢复正常工作。

V_{BUCK}欠压关闭

如果线性10A降压电流限制的动作将V_{BUCK}电压降至50V以下超过150mS, 则模块认为有持续过载并将关闭。1S后将自动重启。该功能在启动时也存在, 用于限制输出短路时所传输的能量。

预偏置/反向功率流动

降压和升压级均具有二极管整流器, 从而阻止了模块工作或不工作时的反向功率流动。启动时可以接受V_{BUCK}/+V_{OUT}有电压和/或连接到外部电压源。如果下游电源转换器发生功率反向流动情况, PFC模块将无法避免输出过电压情况, 因为它无法吸入电流。

EMI 特性

输入滤波

如典型应用电路所示, 建议(尽管不是必须)将PFC模块与单独提供的UFLT-3PAW-AA-HM半砖式三相交流输入滤波器模块配对使用。在独立实验室, 作为GJB151B-2003/MIL-STD-461测试中的一部分, 使用带外部滤波器的PFC模块评估板被验证已通过CE101和CE102要求(参见下面的“CE101和CE102测量”)。为进行此测试, 评估板安装在一个箱子中, 并配有一个1.5kW阻性负载和冷却风扇。

如果没有输入滤波器, 在主开关频率点, 满载输入噪声电平(由标准50μH LISN测量)为0.28Vpk(109 dBμV)。使用指定的输入滤波器时, 这会减少大约45dB至1.6mVpk(64dBμV)。由于噪声水平非常小, 因此必须小心操作将与滤波器和LISN之间的未屏蔽输入线的外部耦合减至最小。

如果需要进一步降低在200kHz主开关频率附近的噪声, 则可以在外部滤波器模块和PFC模块之间的三个线路输入端串联添加额外的差模电感。可以在滤波器和PFC模块之间连接相对较长的电缆。任何浪涌保护器件应直接位于PFC模块输入端。

CE101和CE102测量

传导辐射量由独立实验室进行测量。使用标准的50μH LISN, 输入相电频率为400Hz。结果如下所示, 功率水平皆为1500W。

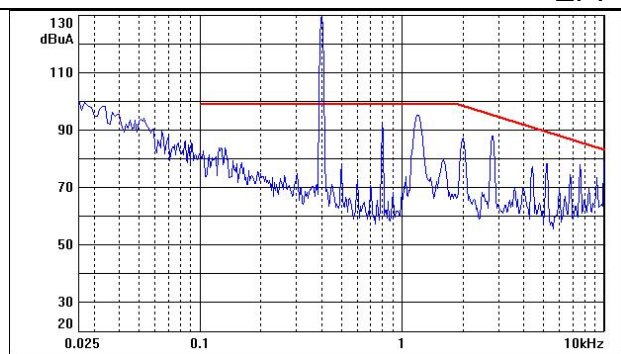


图19, CE101 @ 400Hz, 115(L-N), 1500W output

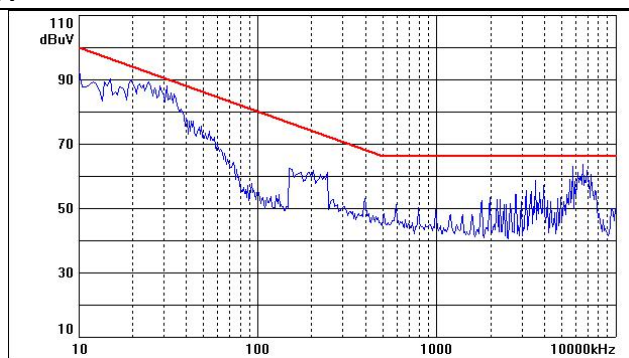


图20, CE102 @ 400Hz, 115(L-N), 1500W output

输入保护

与传统升压拓扑相比，此模块中实现的输入级提供了更好的抗输入浪涌能力。在传统的升压PFC中，没有任何机制可以在工作过程中限制直接从输入到输出的电流流动，因此对于持续时间较长的浪涌，电流会变得非常大并导致相关器件永久损坏。相反，该模块中使用的降压PFC输入级能够在电压浪涌期间中断电流，从而显著降低器件应力。

PFC输入相电必须防止可能超过其575Vpk (L-L) 的绝对最大额定值的尖峰信号。建议在三对PFC线路输入引脚之间直接添加外部保护器件。典型应用图中(页码2)显示了一个示例输入保护电路，包括以“三角形”配置连接在相电之间的钳位器件，其中一个设置在外UFLT-3PAW-AA-HM输入滤波器模块之前，另一个设置在该模块之后。过滤器上游的一组金属氧化物压敏电阻 (MOV) 可防止由于输入接线电感引起的浪涌事件期间的局部电弧放电。这些MOV具有“软”击穿特性：在大电流时，钳位电压高。滤波器模块下游的一组特殊TVS器件具有非常优良特性。Littelfuse生产的这些AK3-430C器件 (或等效的Bourns 的PTVS-430C-TH) 具有出色的钳位电压：即使在大电流时，它们也可保持输入电压低于PFC模块的575 Vpk (L-L) 绝对最大规格。这些器件也具有较高的能量容量：而标准TVS器件的裸片相对较小，AK3系列器件上有许多大型裸片堆叠在一起。这使得AK3可以承受非常高能量的重复脉冲而不会造成损坏。最终用户应用中的保护设备应适合预期的浪涌要求。建议采用额定电流为10 A的保险丝串联在每个输入相线、并位于MOV的上游。

基板电气连接

PFC模块中的所有电路使用多层固体绝缘体与基板实现电气隔离，此隔离栅符合基本绝缘要求、生产时进行100%的2150Vdc耐压测试。因此基板和角安装柱可以连接到应用电路的保护地。所有外部电路应与连接到基板的四个角安装柱保持足够的电气间隙。

SHIELD (引脚8)

SHIELD网络通过电容器内部耦合到输入和输出电压，因此能够局部地屏蔽高频电磁辐射。如果需要，该引脚可以连接到模块下面的浮空屏蔽平面，但必须始终悬空。当模块焊接到PCB载板上时，这个较低的SHIELD平面通常会被构建在载板PCB的最顶层。内部泄漏电阻将SHIELD引脚保持在伪中性线电位。

控制引脚

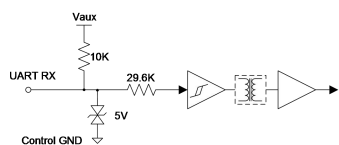


图21, UART RX内部电路

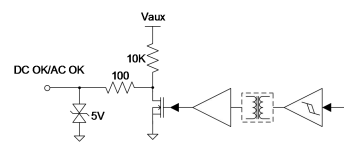


图22, AC OK和DC OK内部电路图

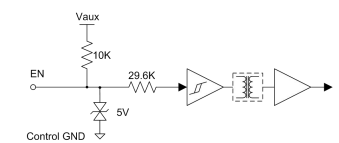


图23, EN内部电路

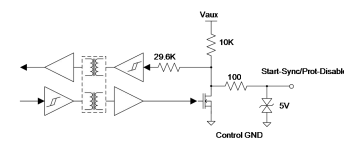


图24, 保护功能屏蔽和同步启动引脚内部电路

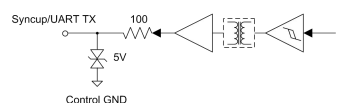


图25, UART TX和频率同步输出内部电路

START SYNC (引脚A1)

引脚A1被指定为START SYNC，并且仅在在并联选项模块上实现 (即EPFC-3PAW-1K5-270-FP)。该引脚不用于标准型号 (即EPFC-3PAW-1K5-270-FX)，不使用时应悬空。在并联应用中，把多个模块的START SYNC连在一起，可以保证在故障状态后同步重启。内部接口电路如图24所示。

CTL GND (引脚 A2)

CTL GND是所有控制信号的参考地。所有控制引脚和电源引脚之间满足1kV的功能绝缘。CTL GND可以在外部连接到任何电源引脚、应用电路或悬空。因不提供安全隔离，所以将CTL GND连接到下游隔离DC/DC转换器的输出端将会破坏由这些转换器提供的任何安全等级。如果需要，可以用AUX给外部满足安全等级的隔离器供电。

UART RX (引脚 A3)

通过内置的全双工异步串行接口可以访问各种工作参数（电压、电流、温度）。针对可并联模块，还可以通过串行接口控制**PD保护功能屏蔽**和**EN使能**引脚功能。命令可以通过UART RX引脚以9600波特（8N1 - 8个数据位，无奇偶校验，1个停止位）传送到内部DSP。“起始位”或“零”位编码为逻辑低电平。内部波特率比SYNC OUT频率慢20.48倍。两个频率的精度均优于 $\pm 2\%$ 。外部接口电路的频率容限也应该优于 $\pm 2\%$ 的准确度，以确保输入串行数据的最后一位在合适的帧时间内到达。或者，SYNC OUT信号可用于连续校准外部接口电路的波特率，从而允许使用不太精确的振荡器。如果未使用，UART RX引脚可能会保持开路状态，并将在内部上拉至AUX，对应于“空闲”或“停止”状态。内部电路如图21所示。可直接连接到外部微控制器，但连接标准的RS232端口的话需要外部收发器IC来转换电平和极性（参见评估板原理图）。由于没有时钟信号且输入/输出方向已定义良好，因此只需使用一个外部数字隔离器即可实现安全隔离。

UART TX (Pin A4)

每个命令的响应通过UART TX引脚以9600波特（8N1 - 8位数据，无奇偶校验，1个停止位）发送。输出对于“开始”或“零”位是低的。不传输时，输出为高电平，对应于“空闲”或“停止”状态。内部电路如图25所示。可直接连接到外部微控制器，但需要外部收发器IC来转换电平和极性以驱动标准RS-232端口（参见评估板原理图）。

AC OK (引脚A5)

直到正逻辑AC OK输出为高时，模块才会开启，对应的输入相电压典型值为81Vrms（L-N）和149Vrms（L-N）之间。模块运行过程中，当输入电压（在PFC输入引脚处）低于80Vrms（L-N）或高于150Vrms（L-N）时，AC OK输出通常会变为低电平。模块内部测量的为瞬时线电压值，因此以上电压阈值会受到相位和/或幅度不平衡的影响。

AC OK也会对输入频率响应。如果输入频率低于45Hz或高于900 Hz，则AC OK将输出为低电平。

通常AC OK只是用作电源中断警告：AC OK转换为低电平，但是模块仍将继续运行，仅有的例外是出现缺相情况。缺相关闭特性将输入中断后150ms内关闭模块，除非该功能被PD屏蔽（请参阅“缺相关机”一节）。

内部接口电路如图22所示。

DC OK (引脚A6)

启动期间，正逻辑的DC OK信号输出将保持低电平，直到 $+V_{OUT}$ 超过240Vdc上升沿阈值（见图27）。由于140Vdc的下降沿阈值较低，因此输入电源中断期间DC OK通常仍会保持高电平。因此DC OK通常用于指示启动成功，而AC OK用于警告输入电源掉电。典型的DC OK响应时间小于1ms。内部接口电路如图22所示。

EN使能 (引脚A7)

必须使EN引脚为低电平模块才会工作，引脚内有一个10.0k Ω 上拉电阻连接到AUX。因此如果所有控制引脚悬空，则该模块将被禁用。从启用到模块开始启动输出延迟时间典型值为240ms（见图23）。内部接口电路如图23所示。

PD保护功能屏蔽 (A8引脚)

如果将PD引脚从外部拉低至CTL GND，则会禁用过温保护和相位跌落关闭功能。内部一个10.0k Ω 上拉电阻连接到AUX，内部接口电路如图24所示。

AUX电源 (A9 引脚)

只要交流电源在线、无论EN状态如何，AUX电源（标准版本3.3V，定制版本另有定义）可对外供电，额定电流高达100mA（定制版本另有定义），回线为CTL GND。该独立电源由输入或主输出供电，因此如果输入电压中断，但外部保持电容（在 $+V_{OUT}$ 或 V_{BUCK} 上），能够使得 $+V_{OUT}$ 电压仍维持在100Vdc以上，AUX电源输出将始终有效。在输出被禁止、输入400Hz、3相电压中只有2相有效的情况下，内部存储的能量足以保持AUX电源处于正常调节范围。如果3相中仅有1相有效，偏置电源会关闭并周期性重新启动。由于某些内部电路也由AUX供电，因此如果AUX发生外部短路，则此模块将不能使用。

SYNC OUT频率同步输出 (A10引脚)

SYNC OUT输出同主开关同频率的连续脉冲；占空比为50%，因而只有上升沿能用作定时基准。降压和升压转换器之间同步、并以相同的频率工作。如果不使用SYNC OUT引脚，可保持开路。内部接口电路如图25所示。