社　区　规　范

800V 转 50V 30KW PDB 参考设计规范（版本 V0.8）

800V to 50V 30KW PDB Reference Design Specification (Version 0.8)

作者：
何佳泷，北京抖音科技有限公司
程冰，北京百度网讯科技有限公司
王贵林、李升、席朝飞，京东云计算有限公司
余曦，北京快手科技有限公司
庞玮、吕和栋，天翼云科技有限公司
陆汉城，上海哔哩哔哩科技有限公司
陈立波，任晓磐，小红书科技有限公司
刘造，中兴通讯股份有限公司
李武，锐捷网络股份有限公司
韩坤、葛科勇、王震、李刚、刘玉龙、王才兵，汇川联合动力系统股份有限公司
朱鹏程 周新 邵勇全，台达电子企业管理（上海）有限公司
张晋颖、吴恒，长城电源技术有限公司
韩明明，华为技术有限公司
刘少纯，魏海彬，徐晟，张兴宇，黎彦君，刘顺满，芯源系统股份有限公司
祝锦，黄秀成，讯湃科技（上海）有限公司
韩龙飞，张俊文，深圳麦格米特电气股份有限公司
刘波，闵峰，苏州悉智科技有限公司
徐迎春，田若男，罗月亮，永初智元（上海）科技有限公司
姚志成，杨璐宁，宋清亮，英飞凌科技（中国）有限公司
吴国继，刘诣林，安费诺公司
崔君君 李建邦，莫仕（中国）投资有限公司深圳分公司
聂静良，中航光电科技股份有限公司
魏晓刚，余训龙，杭州芯宇半导体有限公司

全球计算联盟 Open AI Infra 社区

开放规范许可证（类型 B）

本许可证是本开放规范（本规范）贡献者与其使用者之间的法律协议。一旦使用本规范，即视为同意遵守本许可证条款。若不同意遵守本许可证，请勿使用本规范，否则可能构成侵权。若文档以压缩包（如"zip"文件）形式分发且包含本许可证，则该压缩包中的所有文件均受本许可证约束，除非另有明确排除条款。

1．定义

1.1 本许可证：是指本开放规范许可证(类型A)。除全球计算联盟外，其他主体无权对本许可证进行修改。

1.2 本规范：是指在本许可证下许可的设计材料或数字代码等信息，不论其置于任何载体上或以任何方式表达，例如示意图、机械图纸、流程图及说明性文字、电路或电路板布线图、集成电路布图设计（包括拓扑图/掩模作品）、元器件排列图及其他说明材料等。

1.3 符合产品：是指完全符合本规范中就对应产品形态所规定的所有规范性要求的产品。

1.4 贡献者：是指以明示或默示方式签署贡献者许可协议（类型 A），并参与开发本规范的主体。

1.5 被许可方：是指遵守本许可证，并实施(a)使用、复制、修改或分发本规范中的任一行为，或实施(b)制造或委托他人制造或分发硬件中任一行为的主体。

1.6 分发：是指通过任何媒介向第三方传输、发布、提供或以其他方式传递本规范的行为。

1.7 修改：是指对本规范进行改造、改编、翻译、组合等。

2. 知识产权许可和不诉承诺

2.1 著作权许可：在被许可方遵守本许可证所有条款和条件，特别是条款2.2的前提下，每个贡献者根据《贡献者许可协议（类型A）》授予被许可方永久的、全球性的、非独占的、免费的、免版税的著作权许可，以**复制、创作衍生作品、公开展示、公开演示、再许可及分发**本规范及其修改，**但仅限用于全球计算联盟的开放规范项目**。

2.2 著作权许可条件

在遵从以下条件的前提下，被许可方才可以在任何媒介中复制、分发本规范和/或其修改：

2.2.1 被许可方必须向本规范的接收者提供本许可证的副本；

2.2.2 被许可方必须保留本规范的所有著作权、集成电路布图设计专有权、专利、商标及归属声明，但与本规范任何部分均无关的除外；

2.2.3 如被许可方对本规范进行修改并分发，被许可方必须向全球计算联盟提供修改说明及贡献修改后的文件。

3. 其他

3.1 除上述第2条许可条款之外，本许可证不提供任何其他知识产权的授权。

3.2 免责声明：许可方按"原样"提供本规范，不提供任何明示或默示的担保，包括但不限于任何所有权、不侵权、质量合格、适销性、特定用途及适用性的担保。被许可方应自行对自身使用、复制、修改、分发本规范及其修改或制造、使用、销售、许诺销售、进口基于上述文件开发的产品的适当性进行判断，并全权承担与之相关的所有风险，以及行使本许可证授予被许可方的权利相关的其他所有风险。

3.3 责任限制：在任何情况下，无论基于任何法律依据，全球计算联盟及任何贡献者均不对被许可方因使用、复制、修改、分发规范及其修改或其中的贡献或制造、使用、销售、许诺销售、基于上述文件开发的产品而引发的任何损害，包括但不限于利润损失或任何形式的间接、附带、特殊或后果性损害赔偿责任，无论是基于违约、侵权（包括疏忽）或其他原因，也无论被损害方是否已被告知该等损害的可能性。

4. 通用条款

4.1 如果被许可方违反本许可证，则被许可方基于本许可证所获得的所有许可和承诺将自动终止，被许可方应立即删除并停止使用本规范及其修改。本许可证终止后，第3.2、3.3款继续有效。如被许可方基于本许可证所获得的许可和承诺按本款规定终止的，不影响从被许可方处取得副本或权利的下游接收者在本许可证下的授权。

4.2 法律适用：本许可证适用中国法律。

版本变更日志

版本号	版本描述	贡献者
V0.8	首次发布	编委会成员

目　录

1　范围 5
2　设计总览 5
2.1 整体方案 5
2.2 基础参数 6
3　电气设计 6
3.1　电气规格要求 6
3.2　参考设计 9
4　结构设计 24
4.1　特性 24
4.2　结构尺寸 25
4.3　连接器与 Pin 脚定义 25
4.3.1 输入连接器（800V 直流侧） 25
4.3.2 输出连接铜排（50V 直流侧） 25
4.3.3 信号连接器 25
4.3.4 通用测试与验证要求 26
4.4　冲击与振动 26
5　热设计 26
5.1 环境温度条件 26
5.2 液冷边界条件 27
5.3 器件降额 27
6　EMC 31
6.1 判据说明 32
6.2 测试项说明 32
7 安规 37
7.1 绝缘配合 37
7.1.1 过电压 37
7.1.2 污染等级 37
7.1.3 工作海拔 37
7.1.4 绝缘结构 37
7.1.5 电气间隙 37
7.1.6 爬电距离 37
7.1.7 固体绝缘 38
7.1.8 PDB 的保护接地 38
7.2 安规试验 38
7.2.1 电能量源的分类 38
7.2.2 球压试验 38
7.2.3 电气间隙和爬电距离 38

7.2.4 粘合接缝试验 38
7.2.5 抗电强度试验 39
7.2.6 湿热处理 39
7.2.7 电容放电试验 39
7.2.8 正常工作工况温升测量 39
7.2.9 模拟异常工况 39
7.2.10 模拟单一故障工况 39
7.2.11 变压器过载 39
7.2.12 液冷系统相关试验 40
7.3 泄漏排水（疏散）与检测 40
7.3.1 滴水测试 41
8 通讯 41
8.1 PMBus Communication 41
8.2 PMBus Address 41
8.3 PMBus Data Format 41
8.4 PMBus Command 43
8.5 黑盒 54
8.6 远程控制 55
9 可靠性 55
10 测试 58
10.1 功能测试 58
10.2 环境应力测试 70
10.3 软件（固件）测试 82
10.4 EMC 和其他测试 83
10.5 制造符合性测试 83
11 合规性 83

GCC 800V 转 50V 30KW PDB 参考设计

1 范围

本文件基于大禹 3.0 的供电需求，提出 HVDC 800V 转 50V 30KW PDB 的参考设计，包含了电气功能&性能要求，结构尺寸设计，输入&输出连接器接口，冷板进&出水口接口，安规要求，EMC 要求等可以起指导作用的参考设计要求。

2 设计总览

2.1 整体方案

电源分配板（PDB）将机柜垂直母线的 800V 直流输入转换为 50V 直流输出，为下游用电设备供电。800V PDB 的核心功能为：浪涌保护、热插拔、EMC、在线升级(TBD)、PMBUS 通信、DC/DC 等。PDB 内置三个并联的 10kW 全砖式 DC/DC 模块，总供电功率可达 30kW，且支持 45kW@50mS 能力。PDB 安装于服务器托盘内部，采用液冷散热。

图 1 展示了 PDB 整机的整体结构布局示意。PDB 整机与系统的接口包含：1 个 800V 输入连接器、1 个信号连接器、1 组对接 UBB 的输出连接铜排以及 1 组 PDB 冷板输水软管。

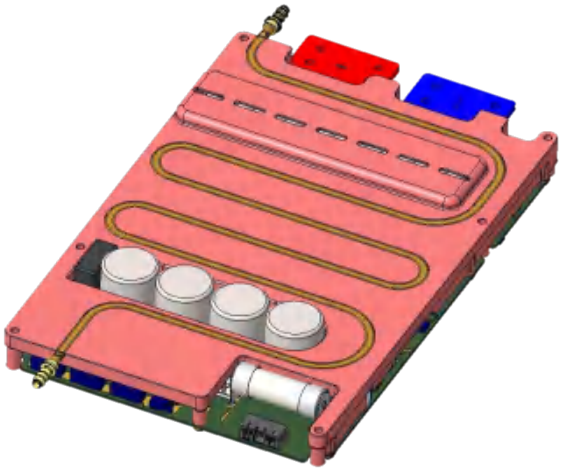


图 1 PDB 整机结构示意图

图 2 展示了 PDB 电气设计整体架构。800V 输入线缆从机柜连接器取电，接入 PDB 电路板。电源输入端配置有保险丝，用于应对线间短路、对地短路故障，实现电路保护。热插拔电路用于抑制服务器托盘热插拔过程中的冲击电流并避免出现分断拉弧。热插拔电路输入端配置瞬态抑制二极管（TVS）等浪涌保护器件。热插拔输出端与电源模块输入电容之间配置 EMC 滤波器，满足电磁兼容合规要求。输入电容并联有高压警示灯以及主动放电电路，用于对输入电容的 800V 高压进行主动放电，避免出现安全隐患。电源模块采用隔离架构将 800V 输入转换成 50V 输出。电源模块输出配置 ORing 电路，用于电源间的防倒灌、故障隔离、以及防止母线电压被电源模块拉低；ORing 输出接低感量输出软铜排，50V 输出通过铜排为下游用电设备供电。辅源从 800V 输入取电，转换成 PDB 内部热插拔、采样电路、MCU 等电路所需供电。MCU 通过 PMBUS 与外部上位机通信，并且具有在位检测等功能；对内监控热插拔、电源模块、PDB 输入输出状态等。

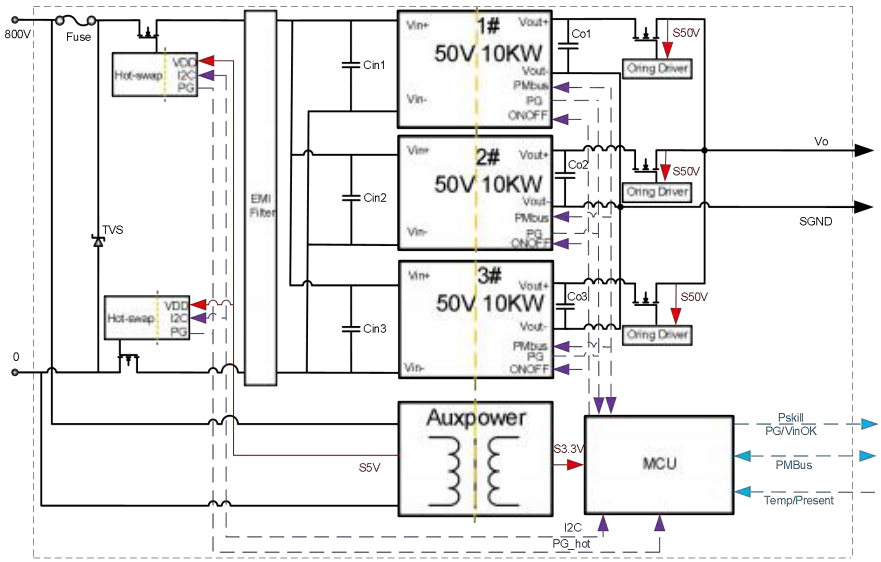


图 2-1-参考设计 1

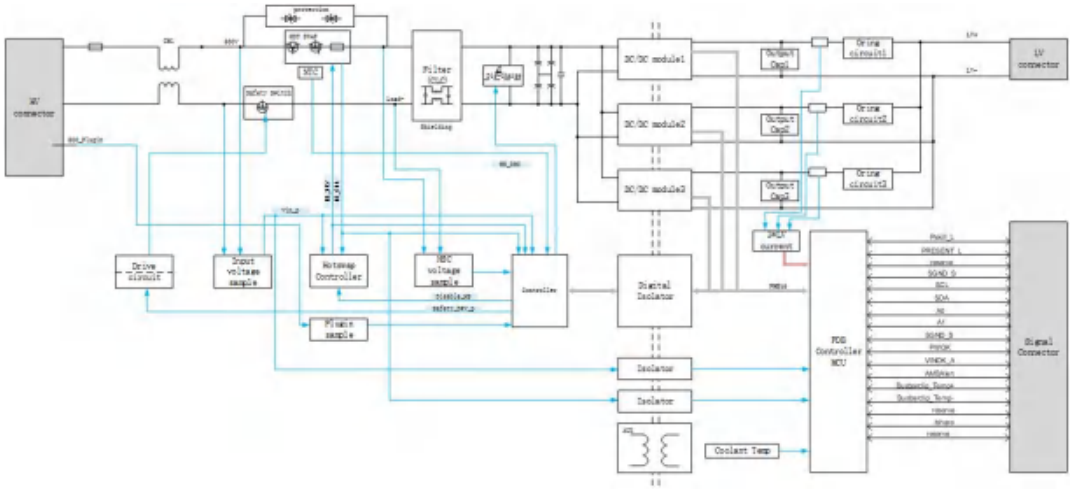


图 2-2-参考设计 2

2.2 基础参数

输入电压：800V±5%
输出电压：50V±5%
TDP：30kW
EDP：45kW@50mS
环境温度：-40~55℃
冷却液温度：40℃
尺寸：330mm * 220mm * 34/38.5mm

3 电气设计

3.1 电气规格要求

3.1.1 输入参数

输入参数	最小值	典型值	最大值	单位	备注/条件
输入电压					
稳态	760	800	840	Vdc	不降额@30kW
瞬态	720		880	Vdc	
输入电流	0.01		42	A	800Vdc
冲击电流			62	A	800Vdc,45kW
输入功率					
稳态	0		32	kW	
瞬态			47	kW	50ms
输入电容	360			uF	

3.1.2 输出参数

输出参数	最小值	典型值	最大值	单位	备注/条件
输出电压类型	固定变比 K=1/16，非调整				
输出电压	47.5	50	52.5	Vdc	输入电压 760~840Vdc
输出电流					
稳态			650	A	输入电压 760~840Vdc
瞬态			900	A	输入电压 760~840Vdc，45kW@50ms
输出功率					
稳态		30		kW	输入 760~840Vdc
瞬态		45		kw	＞50ms
输出纹波 peak-peak		250	500	mV	20MHz BW
输出电容	15			mF	

3.1.3 效率

效率	最小值	典型值	最大值	单位	备注/条件
半载效率	98.0	98.1		%	@ 800Vdc 输出 300A
满载效率	97.5	97.6		%	@ 800Vdc 输出 600A

3.1.4 动态响应

动态响应	最小值	典型值	最大值	单位	备注/条件
电流正向阶跃		2500		mV	10%→200% @1mS 2.5A/uS

电流反向阶跃		2500		mV	200%→150% @50mS 2.5A/uS 150%→10% @30mS

3.1.5 采样精度

采样精度	最小值	典型值	最大值	单位	备注/条件
输出电流	-3		+3	%	
输出电压	-2		+2	%	
输入电压	-2		+2	%	
温度	-5		+5	%	

3.1.6 保护

保护	最小值	典型值	最大值	单位	备注/条件
输入欠压					
欠压阈值	710	720	730	Vdc	
欠压恢复阈值	730	740	750	Vdc	
欠压响应时间			200	us	
欠压回滞电压	5	10		Vdc	
输入过压					
过压阈值	870	880	890	Vdc	
过压恢复阈值	850	860	870	Vdc	
过压响应时间			200	us	
过压回滞电压	5	10			
输入过流	60	63		A	
输出过流保护		700		A	慢速保护
输出短路保护		990		A	快速保护
输出过压保护		55	57	Vdc	
输出欠压保护	45V			Vdc	
过温保护				℃	供应商自定义
过温恢复				℃	供应商自定义

3.2 参考设计

3.2.1 熔断器

熔断器是一种在规定的电压条件下，线路电流通过熔体，利用电流热效应，当热量累积到一定程度时，熔体的特殊部位在约定的时间里熔化、断开，从而安全分断故障电流的器件，具有过流/短路保护、故障隔离、安全合规等核心功能。选型依据如下：

额定电压：大于880VDC

额定电流：根据负载功率加载考虑选择。

分断能力:熔断器必须具有等于或大于被保护电路中可能出现的最大预期短路电流。

过载考虑:熔断器应具有在过载条件下根据熔断器的时间/电流曲线无损开路的最小电流阈值。

保险丝安装位置:保险丝应尽可能靠近输入电源连接器。

具体选型步骤如下：

（1）额定电压需大于电路最大工作电压

PDB输入最大电压为880Vdc，因此额定电压需大于880Vdc，建议选择1000Vdc额定的熔断器。

（2）额定电流（In）考虑如下：

a、使用环境及安装条件对熔断器标称额定电流的影响

$$I_n = \frac{I_{rms}}{K_t * K_e * K_v * K_f * K_a}$$

其中，Irms为流过熔断器的有效电流：

$$Irms = \frac{Po}{Vin*\eta} = \frac{30kW}{760V*97.5\%} = 40A$$

。

b、循环负载电流对熔断器标称额定电流的影响

工作环境温度降容系数：Kt，如图3；考虑工作环境温度-40~55℃，Kt=0.85。

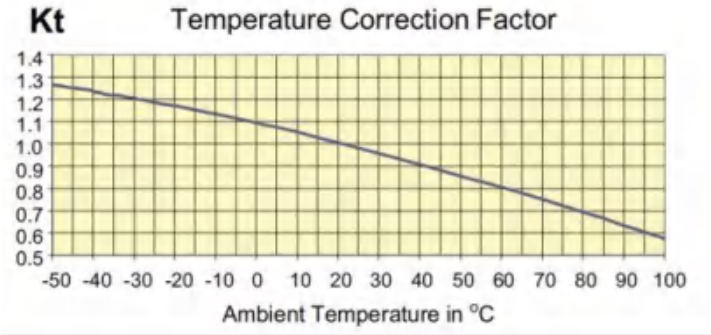


图 3 熔断器环境温度降额系数

熔断器两端接线母排(线缆)电流密度降容系数:Ke,如图;根据通流和连接情况选择,Ke=1。

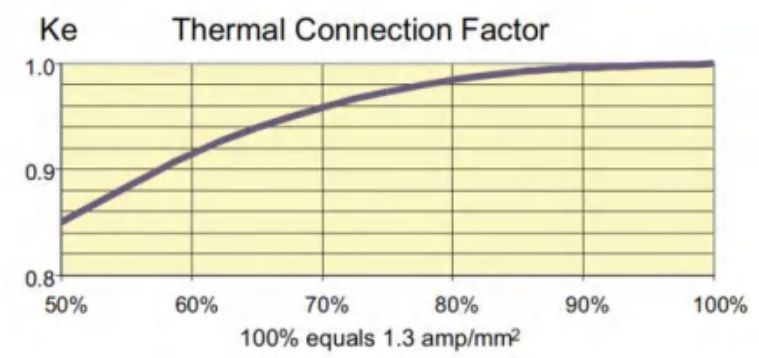


图 4 熔断器热连接降额系数

降温系数：Kv，如图；PDB内部自然散热，无强迫风冷，Kv=1。

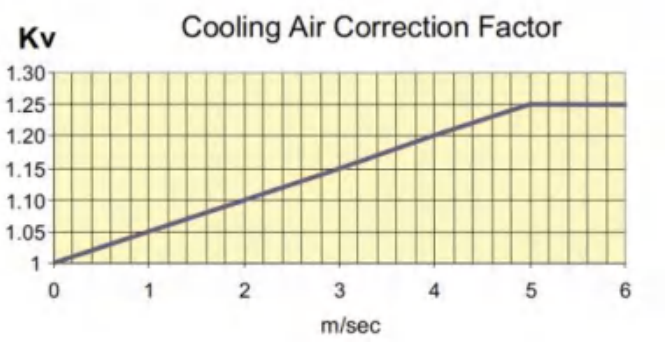


图 5 熔断器冷却空气降额系数

交流回路高频降容系数(如有)：Kf，如图；熔断器位于直流侧，Kf=1。

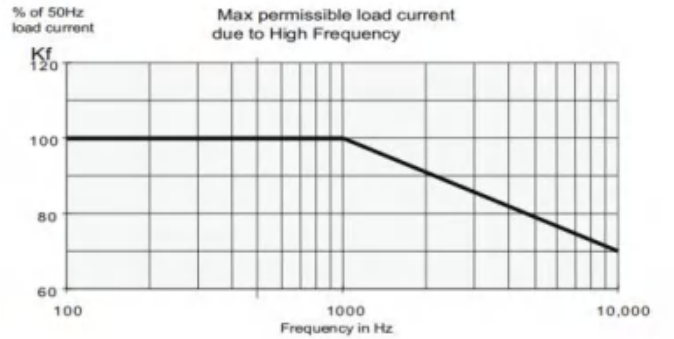


图 6 熔断器频率降额系数

海拔高度降容系数(如有)：Ka；海拔大于2000m需要考虑降额，按照海拔3000m选择，Ka=0.95；

熔断器标称额定电流In的选择可定义为:

实际应用时，流过熔断器的工作电流幅值通常都是变化的，常常伴有过载、浪涌冲击或是负荷电流中断等周期性负载的影响；此类工况通称为循环负载。该情形下，选型需要引入“循环负载系数G”，以对流过熔断器的工作电流有效值Irms进行修正；补充说明，负载电流的规则或不规则变化导致熔断器过早疲劳的循环负载，其每次变化的幅度和持续时间都足以改变熔

断器的温度，从而使那些非常敏感的缩颈处发生疲劳。为了避免这种情况，考虑循环负载系数以确保所选熔断器具有适当的安全裕度。

因此，熔断器标称额定电流In的选择可进一步修正为:

$$I_n = \frac{G * I_{rms}}{K_t * K_e * K_v * K_f * K_a}$$

循环负载系数确定参考下图所示；考虑PDB应用于AI服务器，对EDPP（150%(50ms)，重复周期10s）要求较高。因此，循环负载系数G=1.4。

$$I_n = \frac{1.4 * 40.4A}{0.85 * 1 * 1 * 1 * 0.95} = 69A$$

因此，建议选择标称额定电流TBD，额定电压1000Vdc的熔断器。

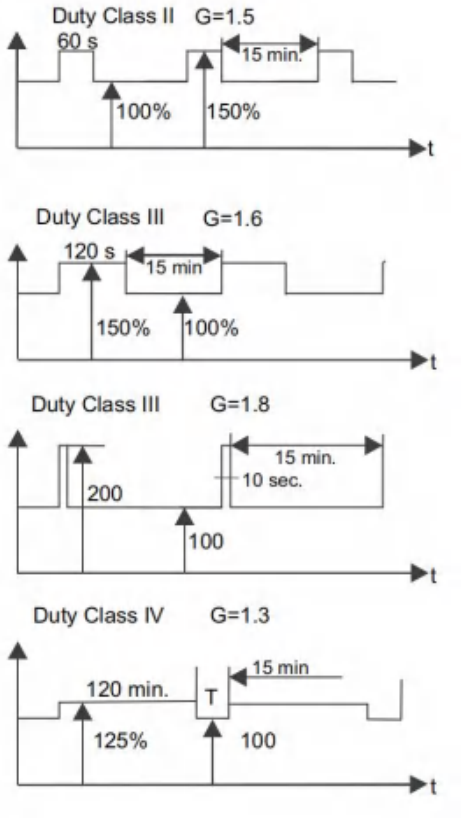


图7 功率循环因数

3.2.2 Hotswap

设计目标：

800V PDB 应用于服务器托盘供电场景，输入侧直接连接机柜 800V 直流母线。服务器托盘存在在线插拔需求，PDB 输入端必须具备 Hot Swap，实现以下目标：

a) 浪涌电流控制。

b） 输入电容预充电控制。

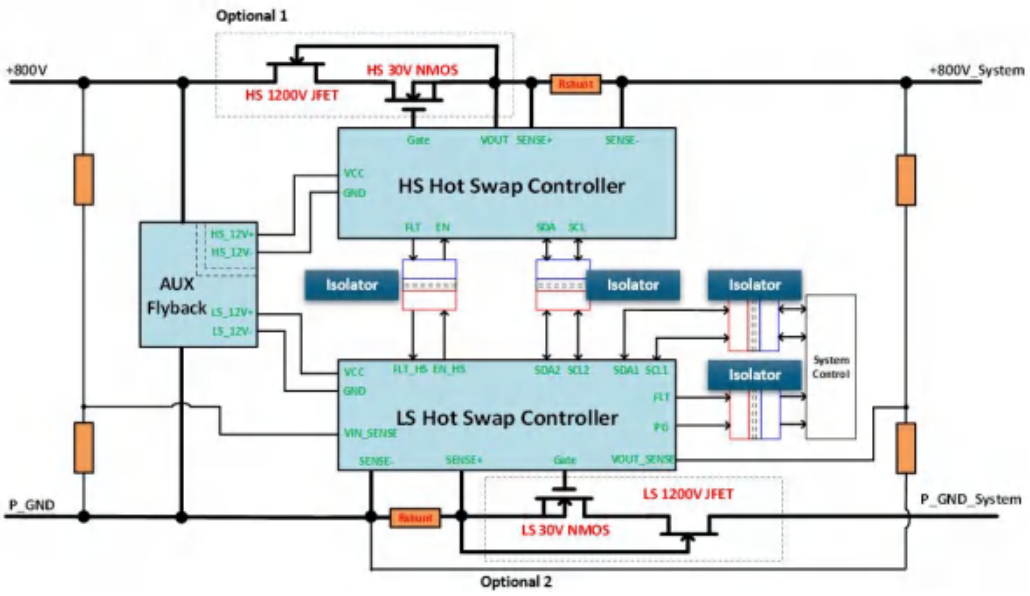
c） 保护和监控，包括能量和功率报告。

2. Hot Swap 系统架构与原理

基于半导体开关的热插拔电路由热插拔控制器、功率开关、信号隔离 IC 和辅助电源电路组成。热插拔电路位于 PDB 中保险丝与 EMC 滤波器之间。该电路在热插入 800V 输入母线或输入功率循环（powercycle）时，保护下游系统——尤其是电容——免受浪涌电流冲击。下图 800V Hot Swap 方案采用浮地双侧热插拔架构（Floating Dual-Side Hot Swap Architecture），通过高边（HS）和低边（LS）两组独立热插拔控制回路，实现 800V HVDC 母线与服务器 PDB 之间的安全连接与故障隔离。同时，基于不同的安全考量，HS 和 LS 是可选择的。

其中，HS 负责+800V 母线的通断控制，LS 负责 P_GND 回路隔离，两侧均采用 1200V SiC JFET 作为功率开关。系统通过 HS/LS Hot Swap Controller 对输入电压、电流、输出电压及器件状态进行实时监测，在服务器托盘插入过程中控制 SiC 器件工作于线性区，实现大容量输入电容的受控预充，抑制浪涌电流并避免连接器插拔产生电弧。

正常运行时，SiC JFET 导通电阻低，功率损耗低；发生过压、欠压、过流、短路或过温故障时，控制器可快速关断功率路径实现故障隔离。同时，系统采用辅助 Flyback 电源为控制器提供隔离供电，并通过数字隔离器实现与系统控制单元之间的通信和 PMBus 监控。



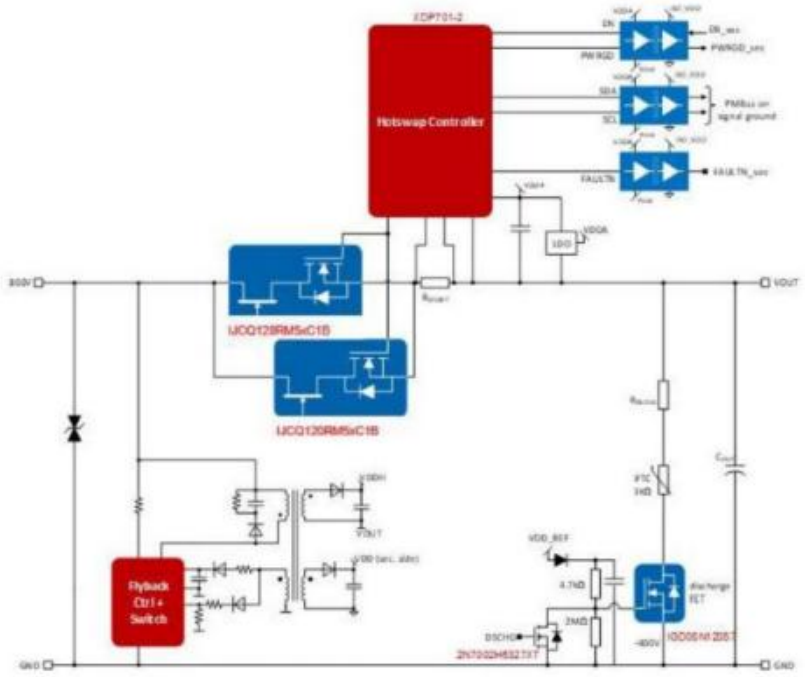


图 x. 800V Hot Swap 架构

4. Hot Swap 功率开关器件选型

为了确保 Hot Swap 的稳定运行，开关器件应力不能超过其额定值。要做到这一点，首先必须了解不同的测试条件以及对应的应力：正常启动（Start-up）、带电短路（Hot-short）、启动短路（Start-up into short）。

4.1 漏源电压 VDS

对于 800V 母线，考虑到母线电压波动与插拔浪涌，建议选择耐压 1.2kV 以上的器件。

4.2 SOA（Safe Operating Area）特性

SOA 特性描述了器件能够在不受损的情况下可靠工作的电压和电流范围，同时考虑到最大功率耗散限制、热约束和器件特性。

不同于普通开关器件，Hot Swap 中的开关器件需要在 PDB 插入母线时控制输入电容充电电流，因此器件工作在线性区，器件同时承受较大的漏源电压和充电电流，需要在较长时间内承受较高功率耗散。假设输入电容为 C，定义启动时间为 T，从 0 V 到 VBUS 的线性充电曲线所需的最小电流为：

$$I_{CHG} = C\frac{V_{BUS}}{T}$$

此时器件最大瞬时功耗：

$$P_{CHG_MAX} = C\frac{V_{BUS}^2}{T}$$

因此所选开关器件必须能承受上述功率耗散，并且在充电过程中的 SOA 轨迹必须在该器件的 SOA 轨迹之内。

4.3 稳态下的导通电阻

在稳态运行期间，功率器件是完全导通的，因此所选开关器件必须足够小以最大化功率传输效率。

根据上述分析，在 800V Hot Swap 中建议选用 SiC JFET。SiC JFET 由于无 MOS 沟道、漂移区设计更优，因此具有更低的导通电阻；同时其正温度系数和良好的线性区稳定性，使其在 Hot Swap 预充阶段具备更强的 SOA 承受能力。

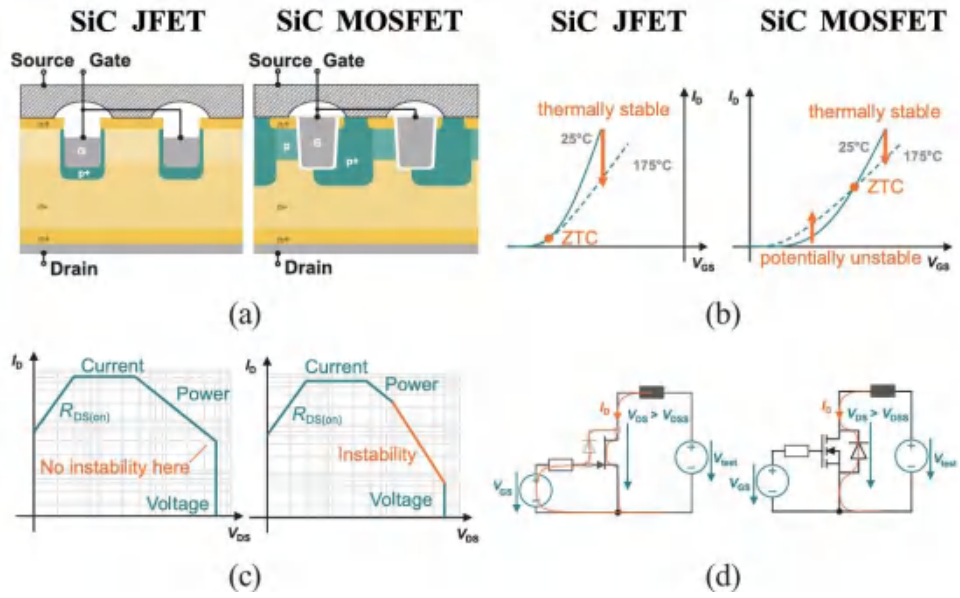


图 2. SiC JFET 和 SiC MOSFET 的比较 (a) cell concept、(b) SOA、(c) 跨导 (d) 等效电路

4.4 并联开关器件时的考虑因素

并联开关器件时必须考虑它们的均流情况。对于热插拔设计，可以进行以下假设：

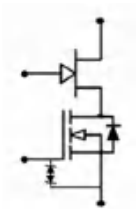
- 当 FET 完全导通（VGS＞10V）时，它们会均匀分担电流。因此在计算稳态温度时，可以假设每个 FET 的电流等于负载电流除以 MOSFET 数量。
- 在启动期间、热短路或启动时遇到短路，MOSFET 处于饱和区（VGS 接近 Vth 且 VDS 较大），这时单个 MOSFET 会承受所有电流。

第一个假设基于两个事实。首先，MOSFET 的 RDSON 通常不会变化超过 ±25%。其次，Rdson 具有正温度系数。因此，如果某个 MOSFET 承受的电流过大升温进而其 Rdson 增加，所承受的电流减小。

但是 FET 在饱和区的工作情况则不同。通流能力与 VGS - Vth 强相关，而 Vth 通常会变化。因此，即使两个 FET 的 VGS 相同，它们的 VGS - Vth 也可能差别很大，从而导致电流差异显著。更不利的是，当在低 VGS 下高温工作时，MOSFET 会吸收更多电流，这会导致正反馈：一个吸收更多电流的 MOSFET 会变得更热，然后吸收更多电流。

5. Combo JFET 结构与器件方案

热插拔功率器件选择 1200VSiC JFET,其宽 SOA 低 Rds(on)特性使其特别适合于热插拔应用。由于 JFET 为常通型器件，无法直接用于热插拔电路，因此需要采用 Combo JFET 结构，即 SiC JFET 级联一个低压 MOSFET，构成常闭型器件，如下图所示。



如图 1 拓扑，当控制器输出低电平关断信号给 LV MOS 时，LV MOS 关断，其 VDS 上升，JFET 的栅源电压变负，实现关断。最终由 HV JFET 承担大部分电压；当控制器输出高电平导通信号给 LV MOS 时，LV MOS 导通，JFET 的栅源电压上升到 0，JFET 自然导通。

由于 PDB 功率为 30KW，考虑到器件散热，建议选择两个 Combo JFET 器件并联使用，每个 Combo SiC JFET 导通电阻为 5mohm 左右，如英飞凌 IJCQ120RM5XC1B。建议采用热插拔专用控制芯片（例如英飞凌热插拔控制器 XDP7**系列）来控制和驱动 Combo SiC JFET 功率管。

3.2.3 输入电容

3.2.3.1 输入电源在 PDB 模块中作用分析，电路简图如下

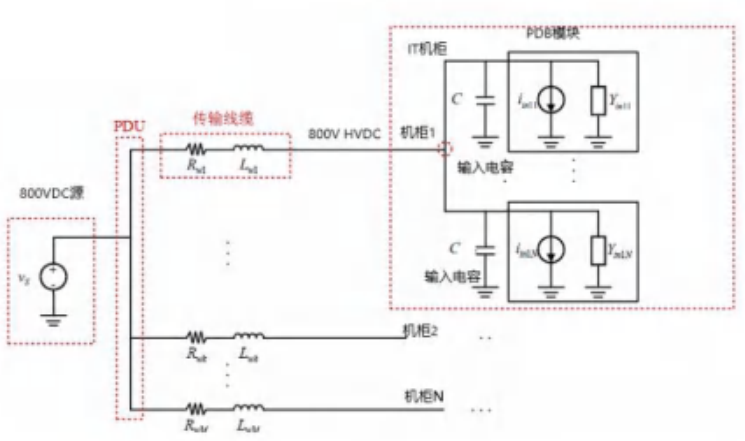


图 x 800V 供电系统简图

3.2.3.2 输入电容电气作用和设计方法：

后级 DCDC 功率变换高频滤波以及 AI 高频波动负载滤波（波动周期＜2mS）；

输入电容需要满足电流有效值降额和母线波动范围要求,设计阶段需要根据负载变化特性做仿真分析，确定高频电流有效值并匹配相应的电容选型和数量；应按照频率系数，将纹波电流(即充放电电流) 折算到额定纹波电流同一频率,详细纹波系数参考厂家规格书(不同厂家规格存在差异)

Frequency(Hz)	Frequency(Hz)	50	120	300	1k	10k	≥50k
Multiplier factor	Multiplier factor	0.80	1.00	1.16	1.30	1.41	1.45

图 x 铝电解电容纹波电流频率系数举例

电解电容平均直流电压、瞬态峰值电压、纹波电流以及温度降额需要满足本规范对应的降额要求；电容温度和寿命需要按照寿命模型评估，需要满足模块寿命规格要求。

3.2.3.3 输入电容容量需要满足模块掉电保持时间要求

掉电保持时间计算公式为

$$T = \frac{1}{2} * Cmin * \frac{\left(U^2_{初始} - U^2_{截止}\right)}{P_{out} * \eta}$$

其中，T 为模块掉电保持时间规格要求，Cmin 为母线电容总容值下限（电容串并联场景需要等效换算），Pout 为输出功率，η为模块转换效率，U 初始为电容放电初始值，U 截止为电容放电截止电压

3.2.3.4 需要满足系统拉远稳定性要求

C＞L/(Ri* （ESR+R)）其中，C 为满足系统拉远稳定的容值最小值；L 为拉远等效电感，可按照线路长度 1uH/m 估算，需要包含 PDB 模块 EMC 滤波差模电感分量；ESR 为输入电容等效串联电阻；R 为供电线路等效电阻；Ri 为 PDB 模块等效输入电阻。

PDB 模组输入电容需要同时满足以上三点设计要求，正确设计容值和器件选型；

3.2.4 输入放电

PDB模块在输入下电或者模块连接器断开后，用户可能会触摸电源模块输入端或者断路器接线端，造成电击伤害。对应IEC62368-1:2023要求如下：

当断开连接器（例如电源连接器）后电容器电压变得可接触时，在断开连接器后5秒（对于B型可插拔设备）或2秒（对于任何其他连接器）测得的可接触电压应符合以下要求：

- 在正常操作条件下，对于普通人员，符合ES1限值；
- 在正常操作条件下，对于受过指导的人员，符合ES2限值；
- 在单一故障条件下，对于普通人员和受过指导的人员，均符合ES2限值。

C nF	ES1 U_{peak} V	ES2 U_{peak} V
300 or greater	60	120
170	75	150
91	100	200
61	125	250
41	150	300
28	200	400
16	250	500
12	350	700
8,0	500	1 000
4,0	1 000	2 000
1,6	2 500	5 000
0,8	5 000	10 000
0,4	10 000	20 000
0,2	20 000	40 000
0,133 or less	30 000	60 000
Linear interpolation may be used between the nearest two points.		

图x 不同容量电容剩余电压要求

结合PDB模块应用场景，推荐按照断开连接器后2秒，端口电压放电至60V以下设计；

3.2.5 浪涌抑制

PDB 输入浪涌防护电路如下图所示，输入浪涌防护电路实现 PDB 模块输入浪涌电压泄放和钳位，保护后级电路应力满足要求。

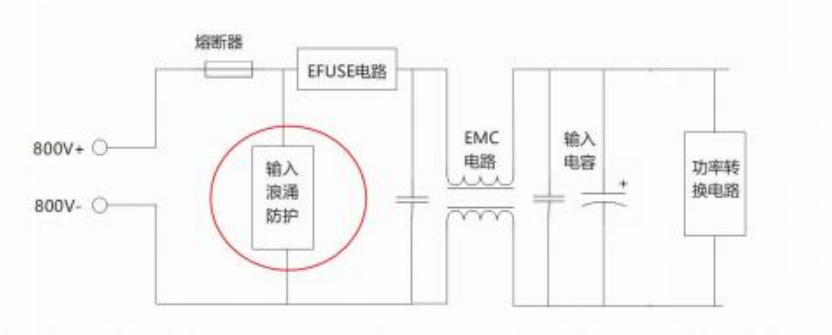


图 3　PDB 模块输入防护电路

输入浪涌防护电路需要在输入异常 uS 级过压时动作，将 PDB 内部电压钳位在器件可承受范围内。推荐防护器件采用双向瞬态抑制二极管（TVS 器件），它是一种特殊的齐纳二极管（Zener Diode），钳位动作时工作在雪崩击穿区，相比压敏器件（MOV）具有以下优点：

对比维度	TVS 二极管	压敏电阻 (MOV)
响应时间	<1 ns	~100 ns
钳位电压精度	高	低
结电容	极低（可<10pF）	高（>100pF）
漏电流	极低	较高

TVS 器件特性曲线如下，器件关键参数包括反向转折电压（V_{RWM}）、击穿电压（V_{BR}）、峰值脉冲电流（I_{PP}）与箝位电压（V_C）：

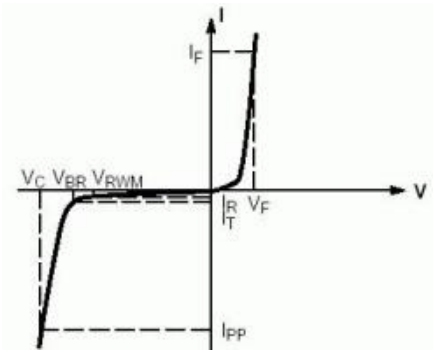


图 4. TVS 器件（单向）IV 特性图

1）反向转折电压（V_{RWM}）

V_{RWM}对应反向漏电流I_R，反映了TVS管在反向击穿前的临界状态。当TVS端电压低于V_{RWM}时器件对被保护线路表现出高阻抗，这也可看作线路的正常工作电压。

2）击穿电压（V_{BR}）

规定TVS管中流过电流I_T时，其两端的电压为V_{BR}。TVS端电压大于V_{BR}时PN结雪崩击穿，器件对地

构成低阻回路，完成保护动作。测试电流（I_T）的典型值为1mA或10mA。

3）峰值脉冲电流（I_{PP}）与箝位电压（V_C）

V_C-I_{PP} 是TVS管最重要的一组参数,它反映了TVS器件的浪涌抑制能力。 当TVS管承受瞬态高能量冲击时，管中流过的大电流随时间以指数形式衰减，时间常数由承受浪涌电流的电路决定；当TVS中流过峰值为I_{PP}的大电流（通常持续时间为1ms）时，其端电压由V_B值上升到V_C值时就不再升高，从而实现后级的保护。当电流由I_{PP}衰减到一定值后，TVS端电压由V_C值开始下降，恢复原来状态。

峰值脉冲电流（I_{PP}）一般可通过8/20us或10/1000us的波形来测定。

瞬态抑制器件选用一般遵循以下原则：

1）击穿电压（V_{BR}）

直流回路要求	min（U_{1mA}）≥（1.3～2）U_{dcmax}	U_{dc}为回路中的直流工作最大电压
注：min（U_{1mA}）为测试电流为 1mA 时的器件击穿电压		

2）箝位电压（V_C）

钳位电压匹配后级 EMC 退藕电路，需要满足后级电容和功率器件电压降额要求，测试验收需要包含轻载条件；

3）峰值脉冲电流（I_{PP}）

需要根据浪涌电流规格要求以及 TVS 器件脉冲功率与脉冲时间、脉冲功率与器件温度降额曲线选型峰值脉冲电流（I_{PP}）器件规格

3.2.6 全砖 DCDC 模块

为了实现PDB的高功率密度，30kW PDB由3个10kw液冷全砖电源模块并联而成，恒定总功率可达30kw。全砖DCDC模块具体参数要求如下：

输入电压：800V±5%

输出电压：50V

TDP：10kW;

EDP: 15kW;

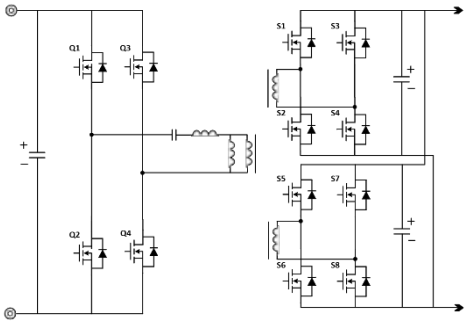
峰值效率：98.4%

满载效率：98%

尺寸：116.8mm*61mm*14mm

800V全砖IBC模块由于高效和高功率密度的需求，一般采用固定频率的无调节LLC拓扑，也称为LLC DCX。它通常工作在几百kHZ，甚至是MHz的开关频率来减小磁件体积，并利用谐振电流实现开关器件的软开关获得高效率,同时还可进一步磁集成将变压器漏感作为谐振电感使用提升DCDC模块的整体功率密度。

传统单级LLC-DCX拓扑如下图所示。针对800v高压直流输入，原边采用1200v SiC 器件，副边采用多个全桥整流并联来应对副边电流应力。



传统单极LLC-DCX拓扑有以下优点：

1）1200v SiC 器件温度特性好，Rdson随温度变化低；

2）SiC器件高温下鲁棒特性更优；

3）SiC器件在车用及工业领域大批量应用；

同时传统单极拓扑在800v全转DCDC模块应用条件下也面临着高效率的巨大挑战：

1）1200v SiC 器件高频下,大电流的开关损耗在软开关工作条件下仍不可忽视，很难工作在更高开关频率比如MHz的开关条件下；

2）DCDC模块的高功率密度及其液冷散热设计，顶部散热的SMD封装是功率器件的必选项。1200v SiC器件顶部散热封装只有QDPAK（15x15.4mm),HU3PAK（14x18.58mm),原边器件占板面积近1000mm²，侵占了平面变压器磁芯的占板面积，影响了磁芯损耗。

为了能选择650V耐压、品质因数（FoM）更优的功率器件去获得更高的模块转换效率，业界为此引入了三电平堆叠半桥LLC和原边串联、副边并联（Input-Series Output-Parallel, ISOP）的级联 LLC 方案。

对于三电平堆叠LLC拓扑来说，由于线路电容及驱动脉冲宽度不对称等非理想因素，在实际运行过程中，输入母线分压电容的电压常会出现逐渐失衡现象。这进而会导致功率开关器件的电压应力增大，从而削弱三电平拓扑结构的固有优势。在极端情况下，甚至可能因过电压而引发开关器件损坏的风险。因此必须加入输入母线电容电压平衡电路防止电容分压失衡导致失效。

ISOP级联LLC拓扑是原边通过两个独立的 LLC DCX 谐振半桥/全桥在直流输入端串联连接，LLC模块的变压器副边进行并联输出,同传统单极LLC-DCX拓扑一样共同分担50V 总线的超大输出电流。

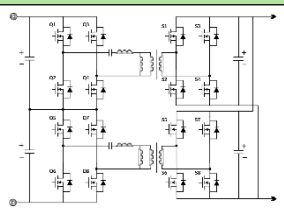
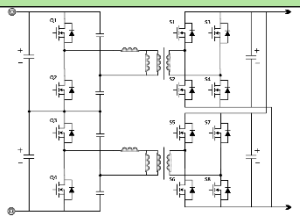
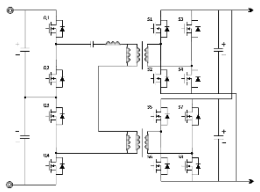
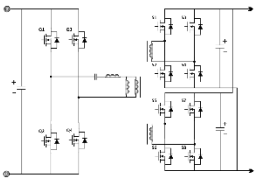
ISOP级联LLC方案的优势：

1）输入自动均压：两个LLC DCX的变压器原边绕组串联且每个LLC模块输入输出为固定变比，800V 输入电压被两个LLC模块天然均分，无需额外控制。因此每个LLC模块的开关管只需承受 400V 左右的电压应力。

2）此拓扑虽然是两个独立得LLC DCX模块，但是可以通过磁集成技术将变压器磁芯进行集成化设计，提升DCDC模块的功率密度。

3）通过交错开关时序控制，该拓扑结构可有效降低输出电容上的纹波电流，从而减小输出电压纹波及输出端的交流损耗。

ISOP级联半桥LLC方案虽然器件数量跟传统单极LLC全桥方案一样,但因为是半桥架构流过原边器件和绕组电流翻倍，对效率有较大的影响。而ISOP级联全桥LLC方案由于原边器件数量相对传统单极LLC全桥方案翻倍达到8pcs，开关器件需要较小尺寸的顶部散热封装，同时在此封装尺寸下原边器件电流还要能满足10kw电流的要求。

ISOP Stacked FB LLC	ISOP Stacked HB LLC	Three Level HB LLC	Traditional FB LLC
			
Pri SW: 650V x 8pcs Sec SW: 80 x 16pcs	Pri. SW: 650V x 4pcs Sec SW: 80 x 16pcs	Pri. SW: 650Vx4pcs Sec SW: 80x16pcs	Pri. SW: 1200V x 4pcs Sec SW: 80 x 16pcs

Pri. Winding: 16T Sec Wind: 1T x 4 sets	Pri. Winding: 8T Sec Wind: 1T x 4 sets	Pri. Winding: 8T Sec Wind: 1T x 4 sets	Pri. Winding: 16T Sec Wind: 1T x 4 sets
Pri SW Irms: Pout/Vbus x (π/4) Pri Winding Irms: Pout/Vo x (π/2√2)	Pri SW Irms: Pout/Vbus x (π/2) Pri Winding Irms: Pout/Vo x (π/√2)	Pri SW Irms: Pout/Vbus x (π/2) Pri Winding Irms: Pout/Vo x (π/√2)	Pri SW Irms: Pout/Vbus x (π/4) Pri Winding Irms: Pout/Vo x (π/2√2)

基于以上拓扑分析对比，为获得较高效率，选用ISOP级联全桥LLC-DCX拓扑做为10kw全砖DCDC模块的参考设计。在ISOP级联LLC拓扑中，原边功率器件的选择直接决定了开关频率（决定体积）和开关损耗（决定效率），可以选用第三代半导体器件650V SiC或者GaN 来实现更高的效率和功率密度。

GaN凭借其优异的开关特性，有着如下优势：

1）运用 GaN 可将电源模块的开关频率提高到 1MHz，变压器体积成倍缩小;

2）GaN 有着极低的开关损耗：输出电容 Coss 极小，反向恢复电荷 Qrr 为零。

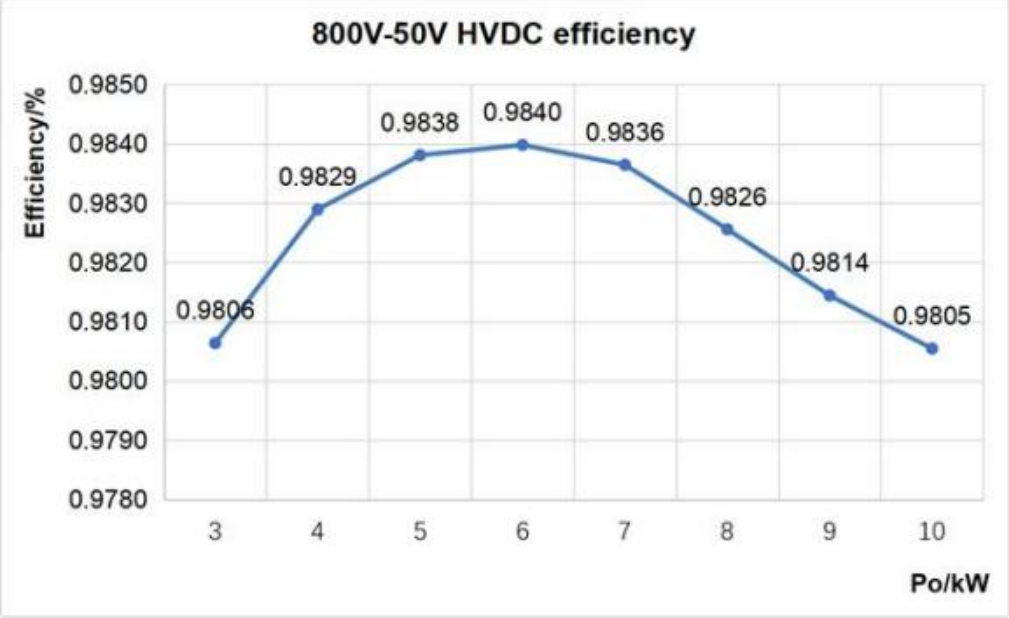
3）GaN 的驱动损耗低，驱动芯片易于散热；

在使用 GaN 时也要注意到 GaN 的开关转换速率可以达到 100V/ns，PCB 布线要针对如此高的 dv/dt 做针对性设计。同时 GaN 的高温特性相对 SiC 偏弱，其硬开关和软开关下的动态电阻需要严格控制。

由于DCDC模块电源的空间限制，在全砖尺寸下原边放置8颗TOLT(10x15mm) GaN 总占板面积达到了1200mm²，布线是巨大的挑战。因此传统650V GaN的顶部散热10*15mm TOLT封装并不适合此应用。新开发的8*8mm 双面散热SMD封装总占板面积为512mm²，跟TOLT相比占板面积降低一半是较优选项。同时随着GaN工艺的升级,在此封装尺寸下GaN的 Rdson最低可以做到10mohm,完全覆盖能10kw的功率需求。下一步可以把驱动集成到8*8双面散热封装里，降低噪声对驱动的干扰，进一步提升GaN的应用可靠性。

650V SiC器件在软开关条件下也可以工作在较高频率，特别是SiC JFET，相同Rdson情况下Coss更小，甚至可以工作在>500kHZ开关频率。再加上SiC优异的高温特性及鲁棒性，650v SiC或SiC JFET也是ISOP级联全桥LLC原边器件的一个较优选项。目前业界小尺寸的顶部散热封装650v SiC选择很少，限制了其在ISOP级联LLC中的应用。

在800v输入满载10kW输出的工作情况下，全砖DCDC模块的满载和30%轻载转换效率已经超过98%，满载规范要求。



3.2.7 Oring 电路

本节规定 30 kW PDB 的 50 V 输出侧 ORing 电路的技术要求、参数建议值及测试条件，HVDC 模块输出端至输出铜排之间的功率路径。

3.2.7.1 术语和定义

ORing 电路：并联电源各支路输出侧的功率开关电路，用于自动选通、阻断反向电流及隔离故障支路。

3.2.7.2 技术要求

a) 应串联于每台 HVDC 模块输出端与 50 V 输出母线之间，每路对应一台 10 kW 模块，共 3 路。

b) 应采用功率 MOSFET 与控制器构成的理想二极管方案，不应采用无反向关断能力的整流二极管。

c) 正向导通、反向关断、投入限流与使能控制应满足建议值。

d) 任一支路退出时其余支路应继续供电，整机降额运行。

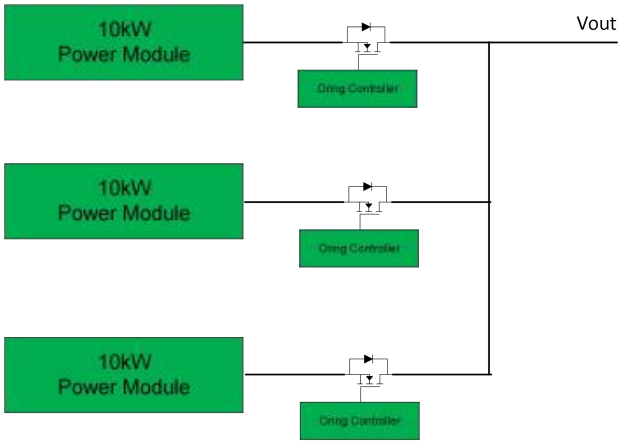
e) 器件应满足降额要求，导通电阻按 250 A 损耗来核算。

f) 状态与故障应上报并记录。

g) 检测方式、栅极驱动方式、器件类型满足要求即可。

3.2.7.3 关键参数建议值

参数	建议值	单位	备注 / 测试条件
ORing 支路数量	3	路	每路对应一台 10 kW 全砖模块
支路额定持续电流	≥250	A	选型基准；对应 30 kW / 3 并留约 25% 裕量
支路脉冲电流	≥300	A	45 kW / 50 ms，即 900 A / 3
支路输入端电压范围	47.5～52.5	Vdc	固定变比 16:1，非调整
功率 MOSFET 漏源耐压 VDS	≥80	V	OVP 上限 57 Vdc 及关断尖峰；重复尖·峰≤90%
单支路总导通电阻 RDS(on)	≤[TBD]	mΩ	按 250 A 设计电流来计算，满足热要求即可
反向漏电流	≤[TBD]	mA	关断状态，VOUT = 52.5 Vdc
单模块输出电容	5	mF	3.2.4
输出母线总电容 CBUS	15	mF	3 × 5 mF
软启动时间 tSS	[TBD]（1～10？）	ms	支路投入时对 CBUS 充电
支路投入浪涌电流	≤[TBD]	A	CBUS = 15 mF、ΔV = 50 V
功率 MOSFET 结温 Tj	≤ Tjmax – 25	℃	



3.2.8 AUX 电路

辅助电源为 PDB 及 HVDC 系统内的控制、保护、通信等功能模块提供低压工作供电。其输入侧接入 800V 高压直流母线，输出侧提供 20V 以下低压直流电。辅助电源设计应优先保障长期运行可靠性与安规合规性，设计选型阶段应统筹确定电气性能、绝缘架构、保护机制等核心技术要求。

3.2.8.1 电气规格要求

1. 输入电压范围：应与 PDB 整机输入电压范围保持一致，覆盖稳态工作及瞬态电压波动工况。

2. 结构高度要求：辅助电源所有器件的最大安装高度应与 PDB 整机的结构高度约束保持一致，适配板级布局空间限制。

3. 输出能力：输出功率、输出路数及电压等级应满足 PDB 内全部低压负载的供电需求，确保各功能模块稳定运行。

3.2.8.2 安规与绝缘要求

辅助电源的安全与绝缘设计应符合 UL/IEC 62368-1 标准相关规定即可

1. 应根据系统接地架构与安全等级要求，确定辅助电源采用隔离型或非隔离型架构；

2. 隔离型辅助电源的原边高压侧与副边低压侧之间，电气间隙、爬电距离应满足对应绝缘等级的限值要求；

3. 隔离变压器等核心绝缘器件的耐压水平、漏电流指标应符合安规标准规定。

3.2.8.3 保护功能要求

辅助电源应配置完备的故障保护机制，至少应包含以下保护类型：

- 输入欠压保护（UVP）
- 输入过压保护（OVP）
- 输出过流保护（OCP）
- 输出过功率保护（OPP）
- 过温保护（OTP）
- 输出短路保护（SCP）
- 副边整流二极管短路保护

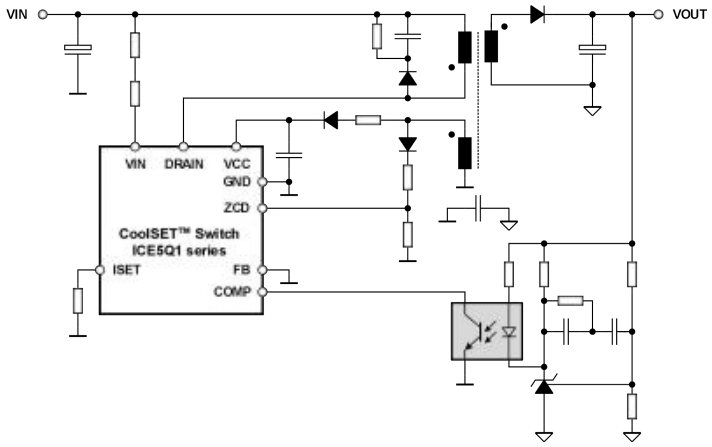
保护动作应具备可恢复特性，不应造成器件永久性损坏，且不应引发起火、爆炸等次生性安全风险。

3.2.8.4 拓扑与器件选型建议

1. 辅助电源主拓扑满足系统要求即可，建议采用反激电路架构，该架构电路结构简洁、运行可靠性高，且易于实现安规隔离要求。

2. 原边功率级宜采用集成 1700V SiC MOSFET 的反激控制器方案，以简化外围电路设计，提升高压工况下的工作可靠性。

3. 英飞凌、MPS、芯朋微、PI 等主流半导体厂商均有符合上述技术要求的成熟量产方案，可作为设计选型参考。



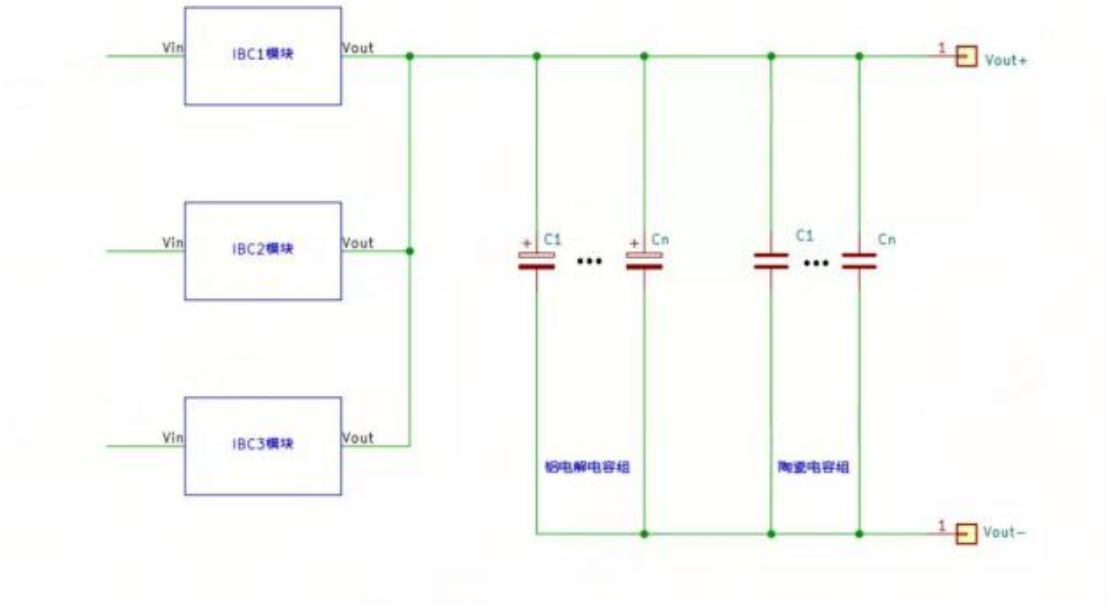
3.2.9 输出电容

输出电容一般主要功能如下：

1.吸收纹波电流，保证纹波电压符合系统要求

2.系统主要储能器件之一，确保系统负载突变时，保证输出电压符合系统要求

基于系统规格书要求，当前 PDB 设计，输出电容容值不低于 15mF,因此选取如下设计：



IBC 模块输出电容为铝电解电容和 MLCC 电容，其中铝电解电容为主要储能电容，保证电容量不低于系统要求的 15mF，并且具备低 ESR，大纹波电流，长寿命特性，MLCC 主要选择温度特性较好的 X7R 等陶瓷电容。其中电容耐压值按照 IPC 9592B-2012 降额标准设计。

4 结构设计

4.1 特性

本章节将定义PDB在服务器托盘内部的安装关系。该互连解决方案具有两个目的：明确PDB的结构安装尺寸和方向以及确定水冷管道安装方式和方向。

4.2 结构尺寸

PDB安装于服务器托盘内

*PDB的外形尺寸、安装方式、水道设计TBD，应与需求方详细交互

4.3 连接器与 Pin 脚定义

本节规定PDB与系统之间电气及信号互连所采用连接器之技术要求，涵盖输入连接器（800V直流侧）、输出连接铜排（50V直流侧）及信号连接器三部分。所有连接器应满足4.2节所定义的基础电气参数，并应通过第9节规定之可靠性测试项目。连接器选型应综合考虑本设计尺寸约束及热设计边界条件（5.1节、5.2节）。

4.3.1 输入连接器（800V 直流侧）

4.3.1.1 电气性能要求

a）额定电压：连接器额定电压应不低于 800V DC，并应预留至 1000V～1200V 之设计裕量，以覆盖±5%电压波动及瞬态过压工况。

b）额定电流：按额定输出功率 30kW、输入电压下限 760V（-5%）、变换效率 97%计算，输入侧工作电流应达 39.5A；连接器额定电流应按不低于 80%降额系数选取，即最小额定电流应不低于 50A。

c）绝缘性能：连接器应通过耐压测试（Hi-pot）及绝缘电阻测试（IR），具体测试电压与判定标准应符合第 7 节安规要求。

4.3.1.2 安全联锁与机械时序要求

连接器应具备下列安全联锁功能，以满足高压直流互连系统电力传输、安全边界、维护边界、故障隔离及系统状态感知五项核心职责：

连接器于分离状态下，插针或插孔不应可触及带电导体（Touch-proof）。

4.3.2 输出连接铜排（50V 直流侧）

TBD

4.3.3 信号连接器

4.3.3.1 概述

信号连接器用于传输托盘在位检测、通讯及告警信号。

4.3.3.2 电气性能要求

项目	要求值	备注
额定电压	≤250V	
额定电流	≤2.5A/pin	
耐电压	≥1500V	
绝缘电阻	≥5000mΩ	
工作温度范围	-40℃～+105℃	覆盖 4.2 节环境温度要求

4.3.3.3 Pin 脚定义

信号连接器 Pin 脚配置应包含下列信号类型，具体分配应符合表 4-2。

连接器PIN定义

PIN号	定义	功能描述	PIN号	定义	功能描述
24	PSkill_L	PDB检测自身是否插到位	23	BusbarClip Temp+	busbar 温度检测信号
22	PRESENT_L	PDB在位信号	21	BusbarClip Temp-	busbar 温度检测信号
20	reserve	预留	19	reserve	预留
18	SGND_S	信号地	17	Ishare信号	多PDB均流信号
16	SCL	时钟线	15	reserve	/
14	SDA	数据线	13	reserve	/
12	A0	地址编辑线	11	reserve	/
10	A1	地址编辑线	9	reserve	/
8	SGND_S	信号地	7	reserve	/
6	PWOK	输出电压信号	5	reserve	/
4	VINOK_A	输入电压信号	3	reserve	/
2	AMBAlert	告警信号	1	reserve	/

4.3.4 通用测试与验证要求

本节所述各类连接器均应通过下列验证项目：额定电流与温升测试、绝缘耐压测试、插拔寿命测试（含半插、慢拔、误插工况）、机械保持力测试及环境可靠性测试（湿热、冷凝、液冷泄漏、振动）。具体测试方法与判定标准应符合第 7 节安规要求及第 9 节可靠性要求；连接器耐受之冲击与振动条件应符合 4.5 节规定。

4.4 冲击与振动

TBD

5 热设计

5.1 环境温度条件

工作环境温度：-40℃~55℃(TBD)

工况	温度范围	说明
低温工作温度	-40℃ ~ 0℃	覆盖冷启动场景、机房空调故障、北方机房极端冷启动
额定工作温度	0℃ ~ 55℃	数据中心典型空调环境（18~27℃）及设备自身温升

注意：海拔 >3000m 时，温度需按标准降额（每 1000m 降额 2℃）。

存储环境温度：-40℃~85℃，非冷凝

条件	范围	说明
基本存储	-40℃ ~ 70℃	覆盖全球陆运/海运/空运及仓储环境，符合 IEC 60721-3-1（1K4 级）
可选扩展	-40℃ ~ 85℃	适用于中东、沙漠地区或非温控集装箱运输，参照 IEC 60721-3-1（1K5 级）

注意：①低温存储时需保证PDB系统内部冷却液排空；

②长期存储（>30 天）建议环境湿度 ≤ 70% RH；

工作环境湿度：20%~85% RH

环境温度	范围	关键约束
-10℃~40℃	20% ~ 85% RH，非冷凝	20%下限防静电，85%上限防潮
40~55℃	20%~60% RH，非冷凝	

注意防凝露保护：产品应具备露点监控功能，当冷却液温度 ≤ 环境露点温度+3℃时，应自动启动加热或限制冷却液温度，确保运行中无凝露发生。

存储环境湿度：5% ~ 95% RH

条件	范围	说明
存储湿度范围	5% ~ 95% RH	覆盖全球各类仓储环境，符合 IEC 60721-3-1（1K4 级）
核心约束	非冷凝	防止长期存储中 PCB、连接器、继电器触点腐蚀

注意：高湿存储后首次上电前，应进行干燥恢复处理（如 40℃ 烘烤 ≥ 4h），确认绝缘电阻符合要求后方可通电

5.2 液冷边界条件

5.2.1 冷却液类型

PG-25：
配方：25% 丙二醇 +75% 高纯度去离子水 + 缓蚀剂、杀菌剂、pH 缓冲剂
冰点约 - 10℃，低毒，OCP/NVIDIA MGX 标准冷板式工质，适配铜、不锈钢、镍镀层冷板；
优点：导热好、粘度低、泵送功耗小、材料兼容性强；
局限：导电，只能走冷板管路，严禁接触 PCB/GPU 芯片。

5.2.2 流量

流量需求TBD

5.2.3 冷却液温度

5~40℃

5.2.4 流阻

TBD

5.3 器件降额

参考IPC 9592B-2012-136页 - 原始.pdf4.4章节和附录A

5.3.1 电容器

器件类型	考核参数	ClassⅠ（5年）应力因子	ClassⅡ（通信10-15年）应力因子	补充说明

MLCC 多层陶瓷电容	直流电压	≤95%	≤95%	1210以上封装建议客户审批；计入纹波峰值；温升自发热不超过20℃
聚合物钽电容 / 聚合物铝电解	直流电压	≤85%	≤70%	ClassⅡ要求40℃、80%负载条件寿命≥10年
薄膜电容（塑料膜）	交直流电压	≤70%	≤70%	工作温度距离器件上限≥10℃
铝电解电容器（普通）	直流电压	≤80%	≤80%	≥250V高压电解直流电压≤90%；纹波电流≤80%；ClassⅡ寿命40℃下≥10年；温度裕量≥10℃
有机半导体电解电容	直流电压	≤85%	≤80%	结温距离器件上限≥20℃

MLCC 会发生氧空位迁移老化；Z5U/Y5V 介质不推荐用于电源；大于 1210 封装需要客户批准；电解失效主要来自电解液挥发，寿命计算必须使用原厂公式；

5.3.2 电阻类器件

器件类型	考核参数	ClassⅠ应力因子	ClassⅡ应力因子	备注
薄膜贴片电阻（厚膜 / 薄膜 / 金属氧化膜）	耗散功率	≤70%	≤60%	壳温≤100℃；最高工作电压≤70%；温度距离上限≥25℃
线绕功率电阻/水泥电阻	耗散功率	≤70%	≤70%	温度裕量≥6℃;脉冲功率看器件手册
可调电位器	耗散功率	≤70%	≤40%	新设计尽量不用电位器；温度裕量≥20-30℃
零欧电阻	电流	≤85%	≤85%	
压敏电阻 MOV	工作电压 / 钳位电压	≤30%	≤30%	功率≤60%，能量≤90% 额定
热敏电阻	耗散功率	≤50%	≤50%	

脉冲峰值功率不能用平均功率降额；高压高阻值薄膜电阻注意螺旋开槽带来高压电离风险。

5.3.3二极管、功率晶体管MOSFET/BJT/IGBT

半导体器件标准：ClassⅠ、ClassⅡ 共用同一套应力限值，核心约束结温 Tj≤Tjmax-25℃

器件类型	考核参数	应力因子限值	备注
普通信号/开关二极管、肖特基二极管	正向连续电流 If	≤90%	瞬态浪涌单独评估
	反向耐压 VRRM	≤70%	关断尖峰电压计入

	功耗 Pd	≤75%	
功率整流二极管（肖特基/SiC）	平均正向电流	≤90%	单次尖峰可到 90% 额定，重复尖峰≤80%
TVS 瞬态抑制二极管	峰值功率	≤70%	
齐纳稳压二极管	功耗	≤50%	串联限流电阻是必须
BJT 双极三极管	集电极电压 Vceo	≤80%	
	集电极电流 Ic	≤60%	
小信号 MOSFET	Vds 漏源电压	≤80%	栅源 Vgs ≤80% 额定；ESD＞1000V
功率开关管（MOSFET/IGBT/SiC/GaN）	漏源电压 Vds	＜200V 器件重复尖峰≤90%；＞200V 器件重复尖峰≤80%	禁止重复雪崩；单次雪崩能量不能超过器件额定 50%
	漏极连续电流 Id	≤90%（含峰值）	
	栅-源电压 Vgs	≤80%	
全部半导体器件	结温 Tj	Tj ≤ Tjmax - 25℃	半导体器件第一优先级指标

1）所有电压计算必须包含开关动态尖峰；

2）功率开关管禁止频繁雪崩工作；

3）并联功率开关管注意栅极匹配，防止振荡损坏栅氧化层。

5.3.4磁性元件：变压器、功率电感

器件类型	考核参数	ClassⅠ应力因子	ClassⅡ 应力因子	备注
功率变压器、功率电感	热点温度(低于绝缘等级温度)	热点温度低于绝缘限值 25℃	热点温度低于绝缘限值 25℃	绝缘等级 A=105℃、B=130℃、F=155℃、H=180℃
EMI 滤波线圈	绕组电流有效值	≤90%	≤90%	浪涌电压≤90% 额定
铁粉芯功率磁件	磁芯最高温度	≤100℃	≤100℃	防止有机粘结剂热老化起火风险

设计磁通密度必须远低于饱和磁通密度；注意居里温度；SMD 磁件注意回流焊热冲击，温升速率建议＜4℃/s。

5.3.5集成电路、混合微电路

器件类型	考核参数	ClassⅠ 应力因子	ClassⅡ 应力因子	备注
硅数字 IC	输出电流	满足器件手册	≤80%	
	结温 Tj	Tj ≤ Tjmax-25℃	Tj ≤ Tjmax-25℃	
双极型线性 IC	输入电压	满足器件手册	≤85%	
	输出电流	≤90%	≤80%	
JFET/MOS 型线性 IC（LDO、运放）	输入电压	满足器件手册	≤70%	
	输出电流	≤90%	≤90%	
混合厚膜 / 薄膜微电路	内部电阻功耗	≤70%	≤70%	
	内部芯片结温	Tj ≤ Tjmax-25℃	Tj ≤ Tjmax-25℃	

未使用引脚不能悬空；注意闩锁效应；长期高温会发生HCI、NBTI器件参数漂移。

5.3.6其他电气元器件（保险丝、继电器、连接器、开关、风扇等）

器件类型	考核参数	ClassⅠ 应力因子	ClassⅡ 应力因子	备注
普通金属保险丝（快断）	稳态工作电流	≤90%	≤90%	
延时慢熔保险丝	稳态电流	≤85%	≤85%	
自恢复 PPTC	持续工作电流	≤80%	≤50%	PPTC 会老化降级
连接器（电源、信号）	电压	≤70%	≤70%	
	额定电流	≤70%	≤70%	多引脚并联额外增加 10% 降额；触点镀金层厚度参考 GR-78-CORE
继电器	阻性负载电流	≤75%	≤75%	
	非钳位感性负载电流	≤75%	≤40%	感性无续流二极管降额大幅收紧；线圈建议并联续流二极管

	触点电压	手册限值内	≤50%	
开关	阻性触点电流	≤90%	≤75%	
	无钳位感性负载电流	≤75%	≤40%	
直流风扇	最高转速	100% 最大转速	90% 最大转速	参考 IPC-9591 风扇标准；ClassⅡ 设备风扇环境温度距离上限≥10℃
光耦	电流	≤70%	≤70%	结温做约束；CTR 电流传输比考虑老化衰减
晶体振荡器	驱动功率	遵循手册	≤33% 额定驱动功率	抗振动选型，避免 PCB 弯曲应力

6 EMC

本章对PDB板需要进行的EMC相关测试项目进行了描述，规定了详细的测试项说明和验收要求。其中与EMC有关的测试项目主要参考：EN 55032/CISPR 32、EN 55035/CISPR 35、FCC Part 15 Subpart B、EN300 386等标准。主要目的是保证PDB在配合系统应用中能够保证EMC性能符合各种认证要求。

表1 EMC测试标准

编号	规格项	端口	规格详细描述
AR-PDB-EMC-1-1	辐射发射	整机	30MHz—6GHz，6GHz—40GHz，Class A 6dB余量；判据A；标准：CISPR32/FCC Part 15/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-2	传导发射	800V DC输入	150KHz—30MHz，Class A 6dB余量；判据A；标准：CISPR32/FCC Part 15/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-3	静电抗扰度	可触及导体、IO口	接触放电±6KV，空气放电±8KV；判据B；标准：EN 61000-4-2/CISPR35/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-4	辐射抗扰度	整机	80MHz—6GHz，10V/m；判据A；标准：EN 61000-4-3/CISPR35/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-5	EFT	800V DC输入、IO口	±2KV，5KHz和100KHz；判据B；标准：EN 61000-4-4/CISPR35/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-6	Surge	800V DC输入、IO口	线线±1KV/2Ω、线地±2KV/12Ω；判据B；标准：EN 61000-4-5/CISPR35/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-7	CS	800V DC输入、IO口	150KHz—80MHz，3V；判据A；标准：EN 61000-4-6/CISPR35/EN300 386
AR-PDB-EMC-1-8	工频磁场	整机	3A/m；判据A；标准：EN 61000-4-8/CISPR35/EN300 386

6.1 判据说明

判据A：试验期间及试验后，设备应能正常工作，性能不下降，功能不丧失。

判据B：试验期间允许性能暂时下降或功能暂时丧失，但试验后应能自行恢复，设备存储的数据不应丢失。

6.2 测试项说明

6.2.1. AR-PDB-EMC-1-1 辐射发射

测试目的：

评估产品在外部环境中产生的辐射干扰，并确认是否符合规范。

参考标准：

CISPR32/FCC Part 15/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：频率范围 30MHz～6GHz、6GHz～40GHz，半电波暗室 3m 法辐射发射测试

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、EMI 测试接收机

4、射频干扰前置放大器瞬态限制器

5、半电波暗室

6、测量天线

评判标准：

符合Class A限值要求，并保留6dB测试余量；判据A；

6.2.2. AR-PDB-EMC-1-2 传导发射

测试目的：

评估产品通过电源端口向外传导发射的骚扰噪声水平，确认设备传导骚扰限值符合规范。

参考标准：

CISPR32/FCC Part 15/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、频率范围 150kHz～30MHz，LISN 采集电源端口传导噪声

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、LISN

4、EMI 测试接收器

5、CE 测试软件

6、暂态限制器

评判标准：

符合Class A限值要求，并保留6dB测试余量； 判据A；

6.2.3. AR-PDB-EMC-1-3 静电抗扰度

测试目的：

确认电源在运行期间能够承受“静电放电电压”，并符合规格要求。

参考标准：

EN 61000-4-2/CISPR35/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、接触放电：±6KV

5、空气放电：±8KV

6、输出电压、接地、超声波焊接线和 LED 指示灯间隙等可接触点实施放电测试

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、静电放电模拟器

4、放电枪

5、示波器

评判标准：

判据B；

6.2.4. AR-PDB-EMC-1-4 辐射抗扰度

测试目的：

评估产品在外部射频辐射电磁场环境下的耐受能力,验证产品在空间射频辐射骚扰环境下的工作稳定性。

参考标准：

EN 61000-4-3/CISPR35/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、频率范围80MHz～6GHz，场强10V/m，1kHz、80% AM 射频电磁场辐照

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、射频信号发生器

4、射频功率放大器

5、发射天线、辐射测试暗室

6、场强探头

评判标准：

判据A；

6.2.5. AR-PDB-EMC-1-5 EFT

测试目的：

评估产品所在电网中感性负载引起的脉冲干扰。

参考标准：

EN 61000-4-4/CISPR35/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：脉冲重复频率5kHz/100kHz，测试电压±2KV，正负脉冲交替注入

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、电快速瞬变脉冲群发生器

4、容性耦合夹

5、耦合去耦网络

评判标准：

判据B；

6.2.6. AR-PDB-EMC-1-6 Surge

测试目的：

评估产品产生的脉冲波在自然闪电或者连接大电容负载的电网中的影响。

参考标准：

EN 61000-4-5/CISPR35/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：线-线±1KV（匹配电阻2Ω），线-地±2KV（匹配电阻12Ω），正负极性交替脉冲注入。

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、浪涌冲击发生器

4、浪涌耦合/去耦网络

5、阻抗匹配电阻模块

评判标准：

判据B；

6.2.7. AR-PDB-EMC-1-7 CS

测试目的：

评估产品对线缆耦合的射频传导干扰的耐受能力，验证产品在射频传导骚扰环境下的工作稳定性。

参考标准：

EN 61000-4-6/CISPR35/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试频率：150kHz～80MHz，3V（开路电压），1kHz 80% AM 调幅射频注入

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、射频信号发生器

4、射频功率放大器

5、CDN 耦合去耦网络 / 电流注入钳

6、阻抗匹配及监测组件

评判标准：

判据A；

6.2.8. AR-PDB-EMC-1-8 工频磁场

测试目的：

评估产品在外部工频磁场环境下的耐受能力，验证产品在工频磁场骚扰环境下的工作稳定性。

参考标准：

标准：EN 61000-4-8/CISPR35/EN300 386

测试条件：

1、输入电压：800Vdc（760Vdc；840Vdc）

2、输出负载：额定负载工况、轻载工况、动态工况 (TBD)

3、环境温度：25 ±5° C

4、50Hz 工频磁场，磁场强度3A/m，连续磁场施加

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载/纯阻性负载

3、工频磁场发生器

4、感应线圈（磁场线圈）

5、磁场监测探头

评判标准：

判据A；

6.3 滤波设计

在电源完成基础功能设计的测试后，应该对电源进行滤波器设计，设计过程中遵循以下步骤：

1.测量电源系统原始EMI。

2.计算电源EMI达标所需的插入损耗大小。

3.设计对应的EMI滤波器。

在设计EMI滤波器的时候，通常将EMI划分为共模EMI与差模EMI两部分，共模EMI滤波器通过设计共模电感与接地Y电容进行抑制，差模EMI通过设计差模电感与X电容进行抑制。

根据电感与电容的摆放位置，单极EMI滤波器的构型可以划分为四种，LC型，CL型，π型与T型，如图6.2所示。将EMI滤波器接入电路前后，负载上接收到的电压之比的对数形式定义为插入损耗，在不同源阻抗和负载阻抗的情况下，选用不同类型的滤波器，以达到最大的插入损耗。

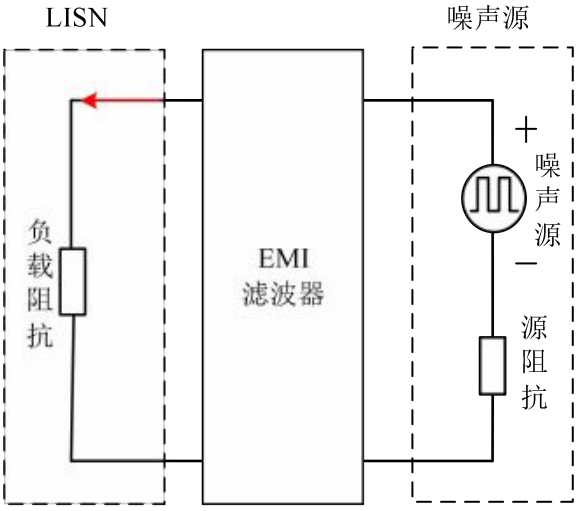


图 x 加装 EMI 滤波器后系统等效电路

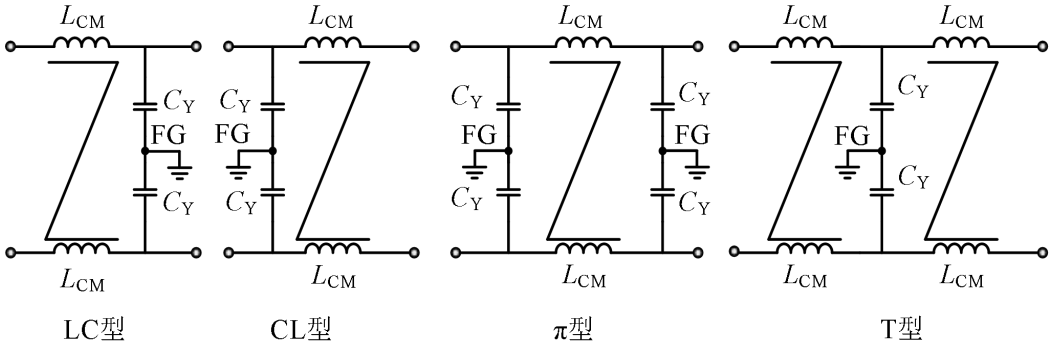
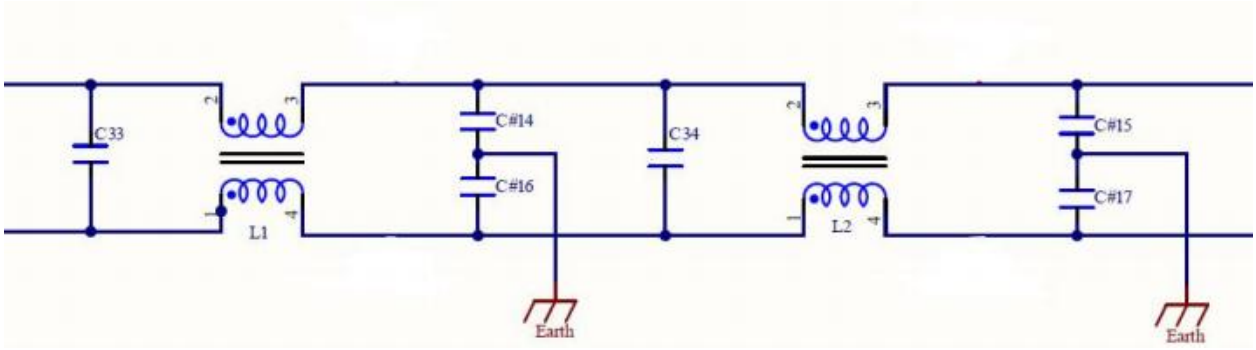


图 x 不同单极 EMI 滤波器构型

表6.2 不同种类的单极EMI滤波器适用条件

种类	适用条件	种类	适用条件
LC 型	源阻抗高 负载阻抗高	π 型	源阻抗高 负载阻抗高
CL 型	源阻抗低 负载阻抗高	T 型	源阻抗低 负载阻抗低

根据系统实际需要衰减的EMI幅值，需要设计不同插入损耗的EMI滤波器。可以根据实际的衰减需求，组合单极滤波器形成最终使用的多级EMI滤波器。图6.3为EMI滤波器按照两级滤波参数进行配置的参考设计方案。



图x 两级滤波参数配置的EMI滤波器

7 安规

PDB 应按照 IEC/EN/UL 62368-1，GB4943.1 标准的最新版本、修订版及修改内容进行设计，以确保最终产品能够获得 CB、CE、UL 和 CCC 等安全认证。

7.1 绝缘配合

7.1.1 过电压

PDB 安装于服务器托盘内部，其过电压等级为 OVCⅡ，过电压为 2500V。

7.1.2 污染等级

PDB 使用环境为室内机房，其污染等级为 PD2。

7.1.3 工作海拔

PDB 设计最高工作海拔为 5000m。

7.1.4 绝缘结构

HVDC 输入端子与低压输出端子和信号端子之间应使用加强绝缘或双重绝缘设计；
HVDC 输入端子与保护接地导体之间应使用基本绝缘设计。

7.1.5 电气间隙

基本绝缘电气间隙应不低于 2.3mm；
加强绝缘电气间隙应不低于 4.5mm。

7.1.6 爬电距离

基本绝缘爬电距离应不低于 4.0mm（材料组别Ⅰ），5.6mm（材料组别Ⅱ），8.0mm（材料组别Ⅲ）；
加强绝缘爬电距离应不低于 8.0mm（材料组别Ⅰ），11.2mm（材料组别Ⅱ），16.0mm（材料组别Ⅲ）。

7.1.7 固体绝缘

基本绝缘无厚度要求，能承受 7.2.5 中基本绝缘抗电强度试验；加强绝缘要求厚度至少 0.4mm，且能承受 7.2.5 中加强绝缘抗电强度试验。

可分离薄层材料基本绝缘无厚度、层数要求，能承受 7.2.5 中基本绝缘抗电强度试验；加强绝缘要求至少两层，且任意一层能承受 7.2.5 中加强绝缘抗电强度试验。

多层印制板的不同层之间基本绝缘无厚度要求，能承受 7.2.5 中基本绝缘抗电强度试验；加强绝缘要求至少三层 pre-preg，且能承受 7.2.5 中加强绝缘抗电强度试验。

7.1.8 PDB 的保护接地

PDB 的接地须直接或作为其他子组件的一部分，以机械和电气上稳健可靠的方式搭接到机架，连接方式和导体尺寸符合 IEC62368-1 的要求。

接地阻抗≤20mΩ。

7.2 安规试验

7.2.1 电能量源的分类

可触及电路电压在正常工作状态、异常工作状态以及单一故障状态下的峰值电压不超过 60Vdc。

7.2.2 球压试验

直接安装带电金属部件的热塑性材料须进行球压试验。

试验按 IEC60695-10-2 中的要求在温箱中进行，试验温箱温度为（T_{max}+15℃）±2℃，不低于 125℃。

试验后，压痕直径应不超过 2mm。

7.2.3 电气间隙和爬电距离

使用游标卡尺测量 HV 侧与低压侧之间的距离，应满足 7.1.5 和 7.1.6 中加强绝缘的要求；

使用游标卡尺测量 HV 侧与保护接地之间的距离，应满足 7.1.5 和 7.1.6 中基本绝缘的要求。

7.2.4 粘合接缝试验

多层印制板内层同一层电路之间距离不能满足 7.1.5 和 7.1.6 中的要求的或使用涂覆、灌封来降低绝缘距离的须进行本试验。

三个样品承受热循环试验 10 次循环，

68h （T_{max} ± 2）° C

1h （25 ± 2）° C

2h （0 ± 2）° C

≥1h （25 ± 2）° C

注：T_{max}为 7.2.6 测量到的 PCB 最高工作温度。

然后三个样品按下列规定进行试验：

其中一个样品在热循环期间的最后一个周期（T_{max}±2）℃的温度后，立即承受抗电强度试验，试验电压为 1.6 倍 7.2.5 中要求的电压，

另外两个样品在湿热处理（湿热处理应当在空气温度为 40±2℃，相对湿度为 93±3%的湿热箱或室内进行 120h。在湿热处理期间，元器件或组件不通电。）后承受抗电强度试验，试验电压为 1.6 倍 7.2.5 中要求的电压。

抗电强度试验期间无绝缘击穿，多层印制板不应出现分层，涂覆或灌封面不应出现剥离现象。

7.2.5 抗电强度试验

基本绝缘试验电压 2500Vdc，
加强绝缘试验电压 4000Vdc，
试验电压应在 5s 内上升至要求值，并维持 60s。
试验期间无绝缘击穿。
抗电强度试验在产品生产过程中应 100%进行，持续时间应为 1s~4s。

7.2.6 湿热处理

湿热处理应当在空气温度为（40±2）℃，相对湿度为（93±3）%的湿热箱或室内进行 120h。
湿热处理后进行 7.2.5 的抗电强度试验。

7.2.7 电容放电试验

HVDC 端子在断开连接 2s 时的电压应不超过 60Vdc。

7.2.8 正常工作工况温升测量

产品分别满载工作在最高工作电压和最低工作电压下，环温和水温选取允许的最大值，使用热电偶测量各关键部件和 PCB 的最高温度。

温度应不超过该部件允许的工作温度。

7.2.9 模拟异常工况

产品在最大电压下满负载工作，放置在铺有一层包着薄棉纸的木板上，并覆盖一层纱布，模拟可能发生的异常工况，例如，输出过载，输出短路，输入反接，冷却液缺失等，模拟异常后进行 7.2.4 的抗电强度试验。

无爆炸，无起火，无绝缘击穿，输出端电压不超过 60Vdc。

7.2.10 模拟单一故障工况

产品在最大电压下满负载工作，放置在铺有一层包着薄棉纸的木板上，并覆盖一层纱布，对可能引起起火或绝缘故障的非安全防护器件做单一故障，短路或开路，取最不利情况，单一故障后进行 7.2.5 的抗电强度试验，

无爆炸，无起火，无绝缘击穿，输出端电压不超过 60Vdc。

7.2.11 变压器过载

将变压器放置在铺有一层包装薄棉纸的木板上，变压器覆盖一层纱布，然后对变压器逐渐加载，直到

发生下列任何一种情况：

——过载保护装置动作，

——绕组发生开路，

——未到达短路或结束条件就已无法再进一步增加负载，

变压器加载到以上任何情况刚好未发生并且工作 7h。

试验期间，变压器不应冒出火焰或熔融金属。纱布不能被烧焦或引燃。试验结束后变压器应能承受 7.2.5 的抗电强度试验，不发生绝缘击穿。

7.2.12 液冷系统相关试验

7.2.12.1 静水压试验

将 1 个液冷系统在室温中以以下情况的最大压力下承受 2 分钟静水压试验，

——正常工作条件下达到最高温度时的最大工作压力的 3 倍，

——异常工作条件（7.2.9）和单一故障工作条件（7.2.10）下达到最高温度时的最大工作压力的 2 倍。

试验期间及试验后，所有连接部分或部件未出现泄漏、破损或松动。

7.2.12.2 蠕变强度试验

其中一个或多个部分由非金属材料制成的液冷系统样品 2 个，使其放置在气流充分循环的温度为 87℃的烘箱内处理 14 天，然后进行 7.2.10.1 的静水压试验。

试验期间及试验后，所有连接部分或部件未出现泄漏、破损或松动。

7.2.12.3 管道和配件兼容性试验

其中一个或多个部分由非金属材料制成的管道和相关配件的样品 10 个，按 ISO 527 系列规定进行拉伸强度试验，5 个样品按接收的状态进行试验，另外 5 个样品应在气流充分循环的温度为 38℃（或最高水温）的烘箱或充满规定液体的温度保持在 38℃（或最高水温）的水槽内处理 40 天后进行试验。这些组件的内部压力保持正常大气压

处理试验后的拉伸强度不应小于处理前的拉伸强度的 60%。

7.2.12.4 热循环试验

1 个液冷系统样品承受 3 次这样的循环：在正常工作条件、异常工作条件（7.2.9）和单一故障工作条件（7.2.10）下所获得的最高温度高 10℃的温度下处理 7h，接着在室温下保持 1h。

试验期间及试验后，所有连接部分或部件未出现泄漏、破损或松动。

7.2.12.5 作用力试验

1 个液冷系统样品承受 30N 的推拉力试验。

试验期间及试验后，所有连接部分或部件未出现泄漏、破损或松动。

7.3 泄漏排水（疏散）与检测

PDB 的设计应确保与液体侵入相关的产品安全风险得到防护，防止电击与火灾。

7.3.1 滴水测试

PDB 的设计应确保冷却液泄漏引发的失效模式不会造成危害状态；

此外，应进行 FMEA 以预判冷却液桥接不同电位网络导致的电路失效，并执行"滴水/冷却液泄漏"测试，验证冷却液泄漏不会导致危害状态。

8 通讯

8.1 PMBus Communication

PDB 具有数字 PMBus 接口，允许系统监控、控制和配置该模块。该模块支持 3 条 PMBus 信号线:Data、Clock、POWER_GOOD (可选)，以及 2 条地址线 A1/A0。有关 PMBus 的详细信息，请参阅《PMBus Power Management Protocol Specification》第一部分和第二部分，修订版 1.2;该规范可在 http://PMBus.org 上查看。PDB 支持 100kHz 和 400kHz 的总线速度。与 PMBus 接口的连接应符合 SMBus 规范 V2.0 第 3.1.3 节提供的高功率直流规格或第 3.1.2 节提供的低功率直流规格。完整的 SMBus 规范可在 http://smbus.org 获取。

注意:如果向该 PDB 连续发送一系列命令且持续时间超过 30ms，则根据 SMBUSAC 规范定义，这些命令中停止与起始条件之间的总线空闲时间(TBUF)不应全部小于 200us。

PDB 支持数据包错误校验(PEC)协议。它可以验证由 PMBus 主设备提供的 PEC 字节，并在所有响应主设备的消息中包含 PEC 字节。该模块无法与未实现写入 PEC 机制的主设备进行通信。

8.2 PMBus Address

通过设置 A0 和 A1 引脚的电阻，可以获得 4 个可能的 PMBus 地址。

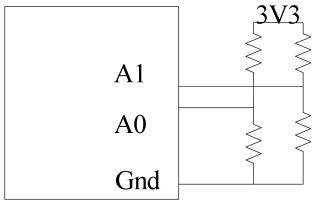


Figure 1 Addresses setting

不同的 PMBus 地址由 A0 和 A1 端口的电平高低定义。当连接到下拉电阻时，A0 和 A1 端口为低电平;当连接到上拉电阻时，则为高电平。地址=8*A0+A1+88。

地址列表：TBD

8.3 PMBus Data Format

The PDB receives and reports data in a LINEAR format. The exponent of the data word is fixed within the reasonable range of the command. Changing the exponent is not supported. The module does not support direct format.

For commands that set or report any voltage thresholds related to the output voltage, the module supports the linear data format consisting of a two-byte value with a 16-bit, unsigned mantissa, and a fixed exponent of -9. The format of the two data bytes is shown below:

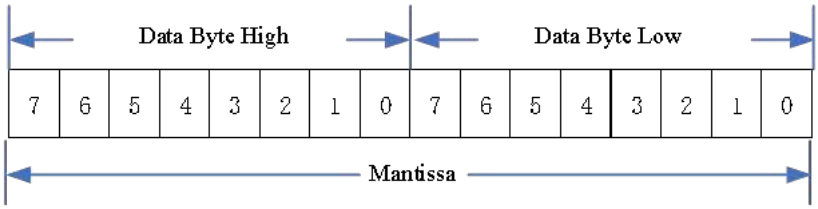


Figure 2 16 bits linear data format

The equation can be written as:

Vout = Mantissa × 2^{-9}

For example, considering set Vout to 55V by VOUT_COMMAND, the read/write data can be calculated refer to below process:

1. Mantissa =Vout/2^{-9}= 55/2^{-9}=28160;
2. Converter the calculated Mantissa to hexadecimal 0x6E00.

For commands that set or report all other thresholds, including input voltages, output current, temperature, time and frequency, the supported linear data format is a two bytes value with: an 11bit, two's complement mantissa, and a 5bit, two's complement exponent (scaling factor). The format of the two data bytes is shown as in below.

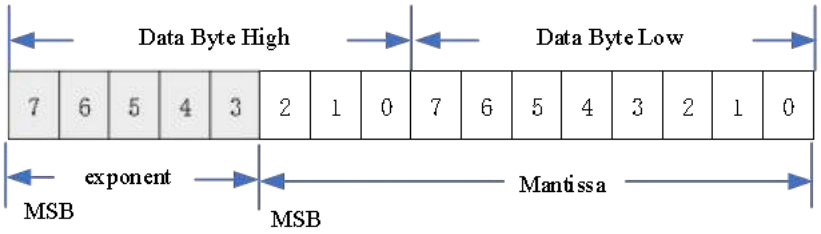


Figure 23 11 bits linear data format

The equation can be written as:

Value = Mantissa × 2^(exponent)

例如，通过 VIN_ON 命令将输入电压锁定下的开启阈值设置为 680V;读写数据可参考以下流程进行计算:

1. Get the exponent of Vin, 0; whose binary is 00000
2. Mantissa =Vin/2^{0}=680/2^{0}=680;
3. Converter the calculated Mantissa 680 to hexadecimal 0x2A8, then converter to binary 01010101000;
4. Combine the exponent and the mantissa, 00000 and 01010101000;
5. Converter binary 0000001010101000 to hexadecimal 0x02A8.

The detail exponent and resolution of main parameter is summarized as below(Option):

	Exponent	Resolution
Vin	0	1V
Vo	-9	1.953mV
Io	0	1A

Temperature	-2	/
Time	-1	0.5ms
Power	6	64W

8.4 PMBus Command

PDB 支持 PMBus1.2 规范中描述的主要 PMBus 命令。部分 PMBus 命令得到完全支持;部分 PMBus 命令与 PMBus 1.2 规范中的定义存在差异。所有支持的 PMBus 命令已详细汇总在下表中。

Command	Code	Description	Type	Compatible with standard PMBus or not?	Data Format	Default value	Range limit	Data units	Exponent	Note
OPERATION	0x01	Turn the module on or off by PMBus command	R/W byte	Refer to below description	Bit field	0x80	/	/	/	/
CLEAR_FAULTS	0x03	Clear any fault bits that have been set	Send byte	Yes	/	/	/	/	/	/
WRITE_PROTECT	0x10	Control writing to the PMBus device.	R/W byte	Yes	/	0x80	/	/	/	/
CAPABILITY	0x19	Information of a PMBus device	Read byte	Yes	/	0xB0	/	/	/	/
VOUT_MODE	0x20	To read Vo data format	Read byte	Yes	mode +exp	0x17	/	/	/	/
VIN_ON	0x35	Set the turn on voltage threshold of Vin under voltage lockout	Read word	Yes	Vin Linear	740	/	V	0	VIN_ON should be higher than VIN_OFF
VIN_OFF	0x36	Set the turn off voltage threshold of Vin under voltage lockout	Read word	Yes	Vin Linear	720	/	V	0	VIN_ON should be higher than VIN_OFF

IOUT_OC_FAULT_LIMIT	0x46	Set the output overcurrent fault threshold.	Read word	Yes	Iout Linear	660	/	A	0	Must be greater than IOUT_OC_WARN_LIMIT value
IOUT_OC_WARN_LIMIT	0x4A	Set a threshold causing an output current high warning.	Read word	Yes	Iout Linear	640	/	A	0	Must be less than IOUT_OC_FAULT_LIMIT value
OT_FAULT_LIMIT	0x4F	Set the over temperature fault threshold.	Read word	Yes	TEMP Linear	110	/	Deg. C	-2	Must be greater than OT_WARN_LIMIT value
OT_WARN_LIMIT	0x51	Set a threshold causing a temperature high warning.	Read word	Yes	TEMP Linear	100	/	Deg. C	-2	Must be less than OT_FAULT_LIMIT value
VIN_OV_FAULT_LIMIT	0x55	Set the input overvoltage fault threshold.	Read word	Yes	Vin Linear	880	/	V	0	/
POWER_GOOD_ON	0x5E	Sets the output voltage at which the POWER_GOOD signal should be asserted	Read word	Yes	Vout Linear	39	/	Volts	-9	Must be higher than POWER_GOOD_OFF value
POWER_GOOD_OFF	0x5F	Sets the output voltage at which the POWER_GOOD signal should be negated	Read word	Yes	Vout Linear	35	/	Volts	-9	Must be less than POWER_GOOD_ON value

TON_DELAY	0x60	Sets the time from a start condition is received until the output voltage starts to rise	Read word	Yes	Time Linear	300	/	ms	-1	/
STATUS_HIGH_BYTE	0x77	Returns the information with high byte of the module's fault/warning	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	ALL of the warning or fault bits set in the status registers remain set, even if the fault or warning condition is removed or corrected, until one of the following occur: 1) The device receives a CLEAR_FAULTS command; 2) Bias power is removed from the module. 3) Enable module on by OPERATION command
STATUS_LOW_BYTE	0x78	Returns the information with low byte of the module's fault/warning	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	
STATUS_WORD	0x79	Returns the information with a summary of the module's fault/warning	Read word	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	
STATUS_VOUT	0x7A	Returns the information of the module's output voltage related fault/warning	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	
STATUS_IOUT	0x7B	Returns the information of the module's output current related fault/warning	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	

STATUS_INPUT	0x7C	Returns the information of the module's input over voltage and under voltage fault	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	
STATUS_TEMPERATURE	0x7D	Returns the information of the module's temperature related fault/warning	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	
STATUS_CML	0x7E	Returns the information of the module's communication related faults.	Read byte	Refer to below description	Bit field	/	/	/	/	
READ_VIN	0x88	Returns the input voltage of the module	Read word	Yes	Vin Linear	/	/	Volts	0	/
READ IIN	0x89	Returns the input current of the module	Read word	Yes	Vin Linear	/	/	Amps	-3	/
READ_VOUT	0x8B	Returns the output voltage of the module	Read word	Yes	Vout Linear	/	/	Volts	-9	/
READ_IOUT	0x8C	Returns the output current of the module	Read word	Yes	Iout Linear	/	/	Amps	0	/
READ_TEMPERATURE	0x8D	Returns the module's hot spot temperature of the module	Read word	Yes	TEMP Linear	/	/	Deg.C	/ -2	/

READ_POUT	0x96	Returns the output power of the module	Read word		Po linear	/	/	W	6	/
READ_PIN	0x97	Return the input power	Read word		Po linear		/	W	6	/
MFR_ID	0x99	Set or read the manufacturer's ID. Total 20 Bytes	Read block	Yes	/	"xxxxxx"				Data that read should be converted to ASCII code
MFR_MODEL	0x9A	Set or read the manufacturer's model name. Total 20 Bytes	Read block	Yes	/	"xxxxxx"	/	/	/	Data that read should be converted to ASCII code
MFR_REVISION	0x9B	Set or read the manufacturer's revision number. Total 20 Bytes	Read block	Yes	/	"VXX.X"	/	/	/	Data that read should be converted to ASCII code
MFR_LOCATION	0x9C	Set or read the manufacturing location of the device. Total 9 Bytes	Read block	Yes	/	"xxxxx"	/	/	/	Data that read should be converted to ASCII code
MFR_DATE	0x9D	Set or read the date the device was manufactured. Total 20 Bytes	Read block	Yes	/	"xxxx/xx/xx"				Data that read should be converted to ASCII code
MFR_SERIAL	0x9E	Set or read the manufacturer's serial number of the device. Total 20 Bytes	Read block	Yes	/	"xxxxxxxxxxxxx "	/	/	/	Data that read should be converted to ASCII code

MFR_FW_VERSION	0xD0	Set or read the manufacturer's firmware revision number. Total 20 Bytes	Read block	Yes		"VX.X.X"				Data that read should be converted to ASCII code
ERASE_BLACKB OX_DATA	0xD1	Erase all black box data.	Send byte	Refer to below description	/	/	/	/	/	/
READ_MODULE1_DATA (Option)	0xDA	Returns the input voltage, input current, input power, output voltage, output current, output power, hot spot temperature, Status word.	Read block	Refer to below description	/	/	/	/	/	
READ_MODULE2_DATA (Option)	0xDB	Returns the input voltage, input current, input power, output voltage, output current, output power, hot spot temperature, Status word.	Read block	Refer to below description	/	/	/	/	/	

READ_MODULE3_DATA (Option)	0xDC	Returns the input voltage, input current, input power, output voltage, output current, output power, hot spot temperature, Status word.	Read block	Refer to below description	/	/	/	/	/	
READ_HISTORY_ EVENTS (Option)	0xE0	Read history event from black box	Read block	Refer to below description	/	/	/	/	/	
SET_HISTORY_EVENT_OFFSET (Option)	0xE1	Set the history event offset	Write byte	Refer to below description	/	/	/	/	/	/
READ_HISTORY_ EVENTS_OFFSET (Option)	0xE2	Read the history event offset	Read byte	Refer to below description	/	/	/	/	/	/

OPERATION [0x01]

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning	Default Settings, 0x80
7:	Enable/Disable the module	1	Output is enabled	1
		0	Output is disabled	
6:0	Reserved			0000000

STATUS_WORD [0x79]

High byte

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	An output voltage fault or warning	1	Occurred
		0	No Occurred
6	An output current fault or warning	1	Occurred
		0	No Occurred
5	An input voltage fault, including over	1	Occurred

	voltage and undervoltage	0	No Occurred
4	Reserved		
3	Power_Good	1	is negated
		0	ok
2:0	Reserved		

Low byte

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	Reserved		
6	OFF (The unit is not providing power to the output, regardless of the reason)	1	Occurred
		0	No Occurred
5	An output over voltage fault	1	Occurred
		0	No Occurred
4	An output over current fault	1	Occurred
		0	No Occurred
3	An input under voltage fault	1	Occurred
		0	No Occurred
2	A temperature fault or warning	1	Occurred
		0	No Occurred
1	CML (A communications, memory or logic fault)	1	Occurred;
		0	No Occurred
0	Reserved		

STATUS_VOUT [0x7A]

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	Output over voltage fault	1	Occurred;
		0	No Occurred
6	Output over voltage warning	1	Occurred;
		0	No Occurred
5	Output under voltage warning	1	Occurred;
		0	No Occurred
4	Output under voltage fault	1	Occurred;
		0	No Occurred
3:0	Reserved		

STATUS_IOUT [0x7B]

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	Output over current fault	1	Occurred;
		0	No Occurred
6	Reserved		
5	Output over current warning	1	Occurred;
		0	No Occurred

4	Reverse	1	Occurred;
3:0	Reserved		

STATUS_INPUT [0x7C]

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	Input over voltage fault	1	Occurred;
		0	No Occurred
6	Input over voltage warning	1	Occurred;
		0	No Occurred
5	Input under voltage warning	1	Occurred;
		0	No Occurred
4	Input under voltage fault	1	Occurred;
		0	No Occurred
3:0	Reserved		

STATUS_TEMPERATURE [0x7D]

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	Over temperature fault	1	Occurred;
		0	No Occurred
6	Over temperature warning	1	Occurred;
		0	No Occurred
5:0	Reserved		

STATUS_CML [0x7E]

Bit number	Purpose	Bit Value	Meaning
7	Invalid/Unsupported Command Received	1	Occurred;
		0	No Occurred
6	Invalid/Unsupported Data Received	1	Occurred;
		0	No Occurred
5	Packet Error Check Failed	1	Occurred;
		0	No Occurred
4:0	Reserved		

READ POWER [0x86]

此命令是读取块 PMBus 通信协议。从 PMBus 返回的数据在下表中显示。

Byte	Content	PMBus exponent
0	Byte count = 16	/
1	Low Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	0
2	High Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	
3	Low Bye. Input Current in PMBus linear type data	-3
4	High Byte. Input Current in PMBus linear type data	
5	Low Byte. Input Power in PMBus linear type data	6
6	High Byte. Input Power in PMBus linear type data	
7	Low Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	-9
8	High Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	
9	Low Byte. Output Current in PMBus linear type data	0
10	High Byte. Output Current in PMBus linear type data	
11	Low Byte. Output Power in PMBus linear type data	6
12	High Byte. Output Power in PMBus linear type data	
13	Low Byte. Temperature in PMBus linear type data	-2
14	High Byte. Temperature in PMBus linear type data	
15	Low Byte. STATUS WORD	/
16	High Byte. STATUS WORD	

READ MODULE1 DATA [0xDA]

该命令是读取块PMBus通信协议。从PMBus返回的数据如下表所示。

Byte	Content	PMBus exponent
0	Byte count = 16	/
1	Low Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	0
2	High Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	
3	Low Bye. Input Current in PMBus linear type data	-3
4	High Byte. Input Current in PMBus linear type data	
5	Low Byte. Input Power in PMBus linear type data	6
6	High Byte. Input Power in PMBus linear type data	
7	Low Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	-9
8	High Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	
9	Low Byte. Output Current in PMBus linear type data	0
10	High Byte. Output Current in PMBus linear type data	
11	Low Byte. Output Power in PMBus linear type data	6
12	High Byte. Output Power in PMBus linear type data	
13	Low Byte. Temperature in PMBus linear type data	-2
14	High Byte. Temperature in PMBus linear type data	
15	Low Byte. STATUS WORD	/
16	High Byte. STATUS WORD	

READ MODULE2 DATA [0xDB]

此命令是读取块 PMBus 通信协议。从 PMBus 返回的数据在下表中显示。

Byte	Content	PMBus exponent
0	Byte count = 16	/
1	Low Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	0
2	High Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	
3	Low Bye. Input Current in PMBus linear type data	-3
4	High Byte. Input Current in PMBus linear type data	
5	Low Byte. Input Power in PMBus linear type data	6
6	High Byte. Input Power in PMBus linear type data	
7	Low Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	-9
8	High Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	
9	Low Byte. Output Current in PMBus linear type data	0
10	High Byte. Output Current in PMBus linear type data	
11	Low Byte. Output Power in PMBus linear type data	6
12	High Byte. Output Power in PMBus linear type data	
13	Low Byte. Temperature in PMBus linear type data	-2
14	High Byte. Temperature in PMBus linear type data	
15	Low Byte. STATUS WORD	/
16	High Byte. STATUS WORD	

READ MODULE3 DATA [0xDC]

此命令是读取块PMBus通信协议。从PMBus返回的数据如下表所示。

Byte	Content	PMBus exponent
0	Byte count = 16	/
1	Low Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	0
2	High Byte. Input Voltage in PMBus linear type data	
3	Low Bye. Input Current in PMBus linear type data	-3
4	High Byte. Input Current in PMBus linear type data	
5	Low Byte. Input Power in PMBus linear type data	6
6	High Byte. Input Power in PMBus linear type data	
7	Low Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	-9
8	High Byte. Output Voltage in PMBus linear type data	
9	Low Byte. Output Current in PMBus linear type data	0
10	High Byte. Output Current in PMBus linear type data	
11	Low Byte. Output Power in PMBus linear type data	6

12	High Byte. Output Power in PMBus linear type data	
13	Low Byte. Temperature in PMBus linear type data	-2
14	High Byte. Temperature in PMBus linear type data	
15	Low Byte. STATUS WORD	/
16	High Byte. STATUS WORD	

8.5 黑盒

该模块具有黑匣子功能。当模块因故障(如过压保护OVP、过流保护OCP、过热保护OTP等)而关闭时，黑匣子会将故障信息记录到非易失性存储器中，以保存历史数据。模块上电后，黑匣子仅记录第一个故障事件;后续故障不会存储在黑匣子中，除非通过输入电压或发送操作命令的ON再次上电，此时才允许再次将故障事件记录在黑匣子中。

支持黑盒功能，具有10,000次擦写周期。10条历史信息存储在闪存中，每条历史信息包含32条记录内容，如下所示。EVENT#是历史事件偏移值。每存储10条历史事件，即对闪存进行一次擦除操作。

Address OFFSET	CONTENT
0	EVENT#
1	STATUS_WORD_HIGH_BYTE
2	STATUS_WORD_LOW_BYTE
3	STATUS_VOUT
4	STATUS_IOUT
5	STATUS_INPUT
6	STATUS_TEMPERATURE
7	STATUS_CML
8	VIN_DATA_HIGH_BYTE
9	VIN_DATA_LOW_BYTE
10	VOUT_DATA_HIGH_BYTE
11	VOUT_DATA_LOW_BYTE
12	IOUT_DATA_HIGH_BYTE
13	IOUT_DATA_LOW_BYTE
14	TEMPERATURE_DATA_HIGH_BYTE
15	TEMPERATURE_DATA_LOW_BYTE
16	RUN_TIME_FIRST_BYTE
17	RUN_TIME_SECOND_BYTE
18	RUN_TIME_THIRD_BYTE
19	RUN_TIME_FOURTH_BYTE
20-31	RESERVE

READ HISTORY EVENT OFFSET [0xE1]

Send read byte command 0xE1 and read one byte, it will return the next history event log offset value X.

SET HISTORY EVENT OFFSET [0xE2]

Then send write byte command 0xE1 and write the offset value X-1 to read back the last history event. The maximum value of the offset is 10.

READ_HISTORY_EVENTS [0xE0]

This is a Read-only command that acquires the history event with the certain offset. This command is a Read Block PMBus communication protocol. The below table shows the returned data from module.

Byte	Content
0	Byte count = 32
1	Event
2 ~ 3	STATUS_WORD
4	STATUS_VOUT
5	STATUS_IOUT
6	STATUS_INPUT
7	STATUS_TEMPERATURE
8	STATUS_CML
9 ~ 10	PMBus Vin
11 ~ 12	PMBus Vo
13 ~ 14	PMBus Io
15 ~ 16	PMBus Tem
17 ~ 20	Run time from turn on to off
21 ~ 32	Reserved

8.6 远程控制

Write byte command 0x10 data=0x00 + pec, unlock write protect;

1.Write byte command 0x01 data=0x80 + pec, the PDB on;

2.Write byte command 0x01 data=0x00 + pec, the PDB off.

9 可靠性

9.1 环境要求

a. 温度

冷却类型	液冷
工作环境温度	-40℃ to 55℃
存储温度	-55℃ to 125℃

b. 湿度

相对湿度范围	8% to 80%

c. 海拔

工作	0-5000m

非工作	0-12000m

9.2 降额设计

PDB应进行全面的应力分析和降额设计。应力分析应包括实际测量的热、电压、电流应力。PDB设计中的元件应适当降额，并符合IPC-9592B 《Requirements for Power Conversion Devices for the Computer and Telecommunications Industries》附录A或供应商自己的降额指南中规定的降额准则。

9.2.1 热应力测试

测试目的：

进行此项测试是为了验证电子元件能否满足各产品在设计阶段所要求的温度环境条件。

测试条件：

输入电压	760Vdc	800Vdc	840Vdc
输出电流	631.5A	600A	571.4A
冷却方式	液冷		
散热片上热点温度	（温度不能超过模块器件的derating）	（温度不能超过模块器件的derating）	
环境温度	（温度不能超过模块器件的derating）	（温度不能超过模块器件的derating）	

判定结果：

测试结果中PDB内部功率器件在最高环境温度、最大输出功率下的壳温、温升和结温在降额范围内。

9.2.2 电压应力

测试目的：

本测试旨在为产品设计者提供指导方针，以提高产品的可靠性水平。

测试条件：

输入电压	760Vdc	800Vdc	840Vdc
输出电流	631.5A	600A	571.4A

判定结果：

测试结果中PDB内部功率器件的电压应力在降额范围内。

9.2.3 电流应力

测试目的：

本测试旨在为产品设计者提供指导方针，以提高产品的可靠性水平。

测试条件：

输入电压	760Vdc	800Vdc	840Vdc
输出电流	631.5A	600A	571.4A

判定结果：

测试结果中PDB功率回路中器件的电流应力在降额范围内。

9.3 高加速寿命测试(HALT)

应对 PDB 执行全面的高加速寿命测试（HALT），旨在通过施加逐步递增的环境及工作应力，尽早暴露产品在设计、器件选型、PCB 布局、结构及热管理等方面的潜在薄弱环节，为设计优化和可靠性提升提供依据。

HALT 应结合 PDB 的工作特点及使用环境，制定相应的测试方案。HALT设备、测试程序、样本量、测试报告和文档，应遵循IPC-9592B第5.2.3节和附录D中规定的要求。测试项目原则上需包括以下内容：

序号	测试项目	主要关注点	监测参数或判据
1	低温步进应力	低温启动、控制电路及辅助电源稳定性	启动状态、输出电压、故障状态
2	高温步进应力	功率器件温升、热设计裕量	器件温度、输出参数、保护状态
3	快速温度变化	焊点、PCB、母排及连接结构的热机械应力	功能状态、连接异常、外观变化
4	振动应力	器件固定、母排连接及焊点可靠性	电气连续性、功能状态、机械异常
5	输入电压步进应力	高低输入电压下的运行裕量	输入电流、输出电压、保护状态
6	负载步进应力	轻载至满载的运行稳定性	输出调节、效率、器件温度
7	组合应力测试	温度、电压和负载共同作用下的薄弱点	关键器件应力、功能状态、异常记录
8	失效分析与整改验证	确认失效机理及改进有效性	失效分析报告、整改记录、复测结果

注：上表中的项目是针对该 PDB 的建议性测试内容，具体项目应根据IPC-9592B和企业可靠性策略确定。

9.4 老化测试(BI)和持续可靠性测试(ORT)

在PDB量产初期，应执行100%老化（Burn-In）或100% HASS（高加速应力筛选）测试。可基于供应商的能力和偏好选择BI或HASS。

BI和HASS测试时长、时长缩减计划以及测试剖面的详细要求，应遵循IPC-9592B附录E中针对第1类PCD产品所规定的要求。

在满足IPC-9592B附录E表E-1所列的可接受失效率标准后，100% BI或HASS可缩减为抽样BI或HASS。

当BI或HASS测试从100%缩减为抽样时，以及在至少一年后取消BI或HASS时，应对PDB执行持续可靠性测试（ORT）。详细的ORT计划和要求应遵循IPC-9592B附录E第E.2.3节中规定的要求。

9.5 制造质量

必须满足IPC-9592B第6章中规定的质量流程要求，包括PFMEA、统计过程控制(SPC)、纠正措施流程、良率控制、材料可追溯性、产品变更通知(PCN)、变更确认等

9.6 平均无故障时间(MTBF)

确定拟议设计中的失效率影响因素。将根据已建立的可靠性模型，采用零件计数分析和零件应力法进行可靠性预测。

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_{ssi(Sum)}} = \frac{1}{\pi_E \sum_{i=1}^{m} N_i \lambda_{SSi}} * 10^9 (Hours)$$

$$\lambda_{SSi} = \lambda_{Gi}\pi_{Qi}\pi_{Si}\pi_{Ti}$$

$\lambda_{SSi(sum)}$	: Total equipment failure rate (FITs = Failures in10^9 hours)
λ_{SSi}	: Failure rate for unit
πE	: Unit environment factor
N_t	: Quantity of device type
M	: Number of different device type in the unit
λ_{Gi}	: Base failure rate for device
π_{Qi}	: Quality factor
π_{Si}	: Electrical stress factor
π_{Ti}	: Thermal acceleration factor

在冷却液温度45° C， 100%负载且置信水平为90%的条件下，该电源的平均无故障时间（MTBF）应大于1000,000小时。

9.7 设计失效模式与影响分析(DFMEA)

● 开展风险评估时须重点关注产品长期承受环境、电气、机械应力的工况；评估依据为本文件规定的设计方案以及最坏工况运行要求。

● 风险评估内容必须包含失效模式、失效对功能 / 外观造成的影响；失效发生概率须基于历史数据或仿真结果确定。

● 被判定为高风险、中风险的项，必须在设计冻结前落实对应的缓解措施。

9.8 可靠性试验

● PDB须通过一整套可靠性试验；试验包含环境应力(对应本文第5章节)、电气应力(对应本文第3章节)、机械应力(对应本文第4章节) 三类试验条件。可将 IPC-9592B作为可靠性试验方案编制的基准参考，但具体试验项目与对应的试验条件，应依据本文件及DFMEA 输出结果确定。

● 新产品开发阶段均需执行可靠性试验，从 EVT 阶段启动，并持续覆盖 DVT、PVT 阶段。

● 部分试验项目的试验时长须达到或等效超过6年运行寿命。可采用基于温度、电气等条件计算的加速因子来缩短试验时长，用以验证本文件规定的极限工况下设计的健壮性。

10 测试

10.1 功能测试

本节对 PDB 板需要进行的功能测试项目进行了描述，规定了详细的测试项说明和验收要求。其中与功能测试项目主要参考：IPC-9592B 第 5 章第 1 节和附录 C。主要目的是保证 PDB 在配合系统应用中能够保证功能性能符合各种认证要求。

测试名称	测试条件	规格	结果

		详细描述	
冲击电流	最大输入电压、最小直流负载、启动	A	
极限工况输入电流	最低输入电压，最大直流负载	A	
开启电压	最小和最大输入电压，最小和最大直流负载	Vdc	
关断电压	最小和最大输入电压，最小和最大直流负载	Vdc	
效率	标称输入电压、半载和满载直流负载、启动/通电	%	
输出负载调节	标称输入电压、最小和最大直流负载	%	
输出电流精度	最小和最大输入电压、25%，50%，100%直流负载	%	
采样精度	标称范围内的输入电压输出电压最大负载	通过/不及格	
输出纹波	最小和最大输入电压，最小和最大负载电压	mVpk-pk &mVrms	
瞬态响应	额定输入电压、从 50%到 100%的分步负载、最小和最大电容值	通过/不及格	
输出过流保护	最小和最大输入电压，启动/稳态状态	A	
输出短路	最小和最大输入电压，最小和最大负载	A	
输出过压保护	最小和最大输入电压，最小和最大直流负载	V	
输出欠压保护	电气要求测试文件	V	
过温保护	电气要求测试文件	℃	

热插拔	电气要求测试文件		
均流	电气要求测试文件		

10.1.1 判据说明

判据 A：试验期间及试验后，设备应能正常工作，性能不下降，功能不丧失。

判据 B：试验期间允许性能暂时下降或功能暂时丧失，但试验后应能自行恢复，设备存储的数据不应丢失。

10.1.2 测试项说明

10.1.2.1 冲击电流

测试目的：

本测试旨在验证，当向 PCD 施加输入电源时，任何电流的突然增加或输入电流的尖峰情况均不应超过规格所规定的限值。由于 EMI 滤波电容器引起的冲击电流可以忽略不计。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：890Vdc；

2、输出负载：空载；

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输入电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.3 测试项说明

10.1.3.1 极限工况输入电流

测试目的：

本测试旨在验证，当向 PCD 施加输入电源时，任何电流的突然增加或输入电流的尖峰情况均不应超过规格所规定的限值。由于 EMI 滤波电容器引起的冲击电流可以忽略不计。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：720Vdc；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输入电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.4 测试项说明

10.1.4.1 关闭/开启电压

测试目的：

本测试旨验证启动电压和关闭电压的滞回特性。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：710V-890V；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输入电压和输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

评判标准：

符合规格书要求；判据 B；

10.1.5 测试项说明

10.1.5.1 效率

测试目的：

此测试旨在验证 PCD 能够达到或超过规定的最低效率标准，并且其功率损耗也能够达到或不超出最大功率损耗值。通常情况下，低电压输入被视为效率的最差情况，而满负载状态则被视为功率损耗的最差情况，除非设计有特殊说明。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：760-840VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输入电压，输出电压和输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

6、功率分析仪

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.6 测试项说明

10.1.6.1 输出负载调节

测试目的：

本测试旨验证负载状况处于规格所涵盖的范围内时，电源的直流输出必须保持在规定的调节范围内。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：760V-840V；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电压和输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.7 测试项说明

10.1.7.1 输出电流精度

测试目的：

本测试旨验证电源设备的在最小和最大输入电压，25%，50%，100%直流负载下的电流精度情况。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：760-840VDC；

2、输出负载：25%，50%，100%负载；

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：最小和最大输入电压，25%，50%，100%直流负载时的输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.8 测试项说明

10.1.8.1　采样精度

测试目的：

本测试旨验证电源设备的输入电压输出电压电流温度的采样精确度。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：760-840VDC；

2、输出负载：25%，50%，100%直流负载

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输入电压，输出电压，输出电流和温度。

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

6、测温仪

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.9 测试项说明

10.1.9.1　输出纹波

测试目的：

本测试旨在验证直流输出端子在所有工作条件下所呈现的纹波程度不得超过规格中所规定的限值。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电压纹波

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、示波器

4、电压探头

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.10 测试项说明

10.1.10.1　瞬态响应

测试目的：

瞬态负载测试旨在验证在向直流输出端施加瞬态负载的情况下，PCD 的输出仍能保持稳定。输出电压的波动幅度不得超过规定值。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：最小和最大输入电压；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输入电压和输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.11 测试项说明

10.1.11.1　输出过电流

测试目的：

本测试旨在验证过电流保护电路的功能。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

评判标准：

符合规格书要求；判据 A；

10.1.12 测试项说明

10.1.12.1 输出短路

测试目的：

通过测试任何直流输出端子出现短路情况时，都将触发短路保护功能。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

评判标准：

符合规格书要求；判据 B；

10.1.13 测试项说明

10.1.13.1　输出过压保护（OVP)

测试目的：

此测试旨在验证过电压保护电路的功能。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC;

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电压，输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

评判标准：

符合规格书要求；判据 B;

10.1.14 测试项说明

10.1.14.1　输出欠压保护

测试目的：

此测试旨在验证欠电压保护电路的功能。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC;

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电压，输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

评判标准：

符合规格书要求；判据 B；

10.1.15 测试项说明

10.1.15.1　过温保护

测试目的：

此测试旨在验证温度保护电路的功能。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：-40℃，25 ±5° C，40℃，55℃

4、测试参数：温度

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

6、温度仪

评判标准：

符合规格书要求；判据 B；

10.1.16 测试项说明

10.1.16.1　热插拔

测试目的：

本测试旨在验证在电源和负载接通的情况下，PCD 在插拔操作时的性能表现。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

6、温度仪

评判标准：

符合规格书要求；判据 B；

10.1.17 测试项说明

10.1.17.1 均流

测试目的：

此测试旨在验证电源的电流分配精度是否符合规范要求。

参考标准：

IPC 9592B

测试条件：

1、输入电压：800VDC；

2、输出负载：最大输出功率 32KW

3、环境温度：25 ±5° C

4、测试参数：输出电流

测试仪器：

1、直流电源

2、直流负载

3、电流探头

4、示波器

5、电压探头

6、温度仪

评判标准：

符合规格书要求；判据 B；

10.2 环境应力测试

必须满足 IPC-9592B 第 5 章第 2 节中规定的环境应力测试要求，主要包括：高加速寿命测试(HALT)、高温高湿加电测试（THB）、高温工作偏置测试（HTOB）、温度循环测试、功率和温度循环测试（PTC）、冲击和振动、随机振动-工作、随机振动-不工作、冲击-工作、自由落体、跌落以及其他环境应力测试。

10.2.1 高加速寿命测试(HALT)

高加速寿命试验（HALT）是作为设计过程的一部分在产品上进行的一系列试验，用于帮助改进产品的健壮性。HALT 的主要思想是尽快发现设计薄弱环节并加以修正。改进一个薄弱环节后，再发现并改进下一个设计薄弱环节，如此往复，直至不存在可能导致现场失效的设计薄弱环节。在 HALT 期间，产品所承受的应力超出产品规范书的规定或产品在典型使用环境中将会遇到的应力，以便快速加速并识别设计薄弱环节。重要的是由此产生的失效，而不是应力水平。HALT 不是合格/不合格试验。它是一项用于探查和改进设计的工作极限与破坏极限的试验。

10.2.1.1 范围与目的

HALT 的目的是保证相对于规定的应力水平具有足够的裕度，并作为在设计发布前发现设计薄弱环节以便采取纠正措施的手段。HALT 的目的特别不包括预计可靠性（失效率）或使用寿命。强烈建议在设计周期中尽可能早地进行 HALT。当所发现的问题能够在其余鉴定试验之前很早得到纠正时，HALT 可取得最佳效果。

10.2.1.2 HALT 试验箱设备要求

10.2.1.2.1 试验箱的热与振动能力

• HALT 试验箱应能够通过在台面下方设置气动锤，产生 6 自由度（3 个线性和 3 个旋转）的多轴、伪随机重复冲击振动，DUT 直接与该台面耦合。

• 振动系统应能够在空载台面上于 5-5,000 Hz 频谱内产生最低 75 Grms 的量级，并且对于任意给定的电源供应器（PSU）重量，至少保留 70% 的能力。

• 试验箱应具有至少 -80 ° C 至 +170 ° C 的温度范围。在实测空气温度下，空气温度变化速率应 ≥60 ° C/min。

10.2.1.2.2 试验箱的最低报告要求

• 试验箱制造商、型号、序列号、校准日期/频次和校准机构、温度范围与变化速率的规格、台面振动规格、试验箱控制软件版本。

• 在所有试验序列期间拍摄以下项目的照片：试验箱布置、单元朝向与安装配置、空气导管配置，以及 ATE/电缆配置。

10.2.1.3 振动与热监测能力

需要采集热和振动数据，以提供可信的证据，证明所要求的应力已施加于试验样品、试验样品的热和振动响应已形成文件，并且按程序要求满足了各曲线。

10.2.1.3.1 加速度计的最低要求

• 用于测量产品振动响应的单轴或三轴加速度计。加速度计宜为低质量型，频率响应能力为 2 Hz 至 10 kHz，测量范围为 ±500 g。

• 加速度计应小到足以安装在 UUT 上的所需位置，并且轻到其质量不会显著影响或改变被试样品的振动动态特性。

• 必须具备足够数量的加速度计，以监测每个被测样品。

10.2.1.3.2 热电偶的最低要求

• 用于 HALT 的热电偶应在试验箱的整个温度范围（约 -100 ° C 至 +200 ° C）内具有足够的稳定性特性。热电偶丝的线径不应超过 22 号线规。

• 必须具备足够数量的热电偶，以监测每个被测样品和试验箱环境温度。

10.2.1.3.3 振动与热监测的最低报告要求

• 每台被试样品上热电偶和加速度计安装位置的照片。

• 用于监测台面响应的加速度计监测位置的照片与位置。

• 用于监测环境温度的热电偶的照片与位置。

• 热电偶类型、制造商。

• 加速度计制造商、型号、序列号、频率响应、测量范围（g）、灵敏度（mV/g）。

10.2.1.4 实验室试验设备

10.2.1.4.1 电源与负载

• 可编程电压源，能够提供所需的功率，并支持应用所需的最低和最高电压范围。

• 可编程电子负载，能够支持所连接的电源供应器输出的最大额定电流和功率。

10.2.1.4.2 监测能力

• 通过使用 HALT 试验系统现有的热电偶监测通道实现热电偶监测能力。还应可配备能够进行多通道测量的外部数据采集仪器。必须具备足够的监测能力，以监测每个被测单元和试验箱环境温度。

• 热电偶测量数据必须能够以电子方式存储。

• 通过电子负载或外部设备，在试验期间监测电源供应器故障状态的能力。

• 频谱分析仪，用于监测台面和产品响应的功率谱密度（PSD）。需要记录每个振动步进序列的 PSD 和 Grms 量级。

10.2.1.4.3 附加硬件

• ATE 与电缆线束，用于支持每台样品的功能试验。

• 足够的安装设备（夹具、横梁、螺栓、螺母等），用于在振动试验期间安装样品。

- 经校准的扭矩扳手。
- 用于支持被试 PSU 特殊要求的任何附加试验硬件。

10.2.1.4.4 实验室设备的最低报告要求

对于所使用的所有试验设备，应提供制造商和型号、与能力相关的关键规格（如电压、电流、用于数据记录的通道数等）、校准日期/频次和校准机构。

10.2.1.5 样品数量

HALT 试验的最小样品总数应为 21，每项试验（低温、高温或温度循环等）中的所有试验样品均应试验至失效，直至达到设备能力极限，或直至达到技术的基本极限。

低温步进试验	高温步进试验	快速温度循环试验	6 自由度随机振动试验	输入电压试验	输出负载试验	综合应力试验
3	3	3	3	3	3	3

10.2.1.6 功能试验要求

样品的功能试验宜提供足够的覆盖率，以确定样品的总体性能以及多种失效模式的发生情况。试验覆盖范围必须包括输入电压和输出负载的变化，以确保在相关电路上施加等效的应力。

10.2.1.6.1 试验前验证

试验样品均应进行初始验证试验，以确保在规定的最高和最低输入电压以及每条输出轨的负载条件下符合产品规范书。试验应在标称环境条件下进行。

10.2.1.6.2 热步进应力/综合环境/快速温度循环

在保温期间的总功率必须等于额定功率的 100%。必须在每个温度下试验最低和最高输入电压条件。供应商应在低线电压下试验一个样品，在高线电压下试验一个样品，在低线或高线中最差的情况下试验另一个样品。

10.2.1.6.3 振动步进应力

被试样品应在标称输入电压下按额定功率的 100% 加载。

10.2.1.6.4 监测

应对试验样品输出的故障状态实施实时监测。

10.2.1.7 试验报告与文件要求

本节规定了为表明符合本文件所定义程序而应满足的最低文件要求。

- 1. 按 10.2.1.5 中关于试验设备和装置所规定的要求执行。
- 2. 电压与电流产品规格。
- 3. 过流保护限值及输入电压规格。

• 4. 产品工作温度规格，包括过温保护（OTP）限值范围。

• 5. 产品型号/物料编号、样品版本、产品开发阶段（例如 EVT、DVT）。

• 6. 试验日期、报告日期/版本、试验地点、执行试验的试验机构（内部机构或外部实验室）、对样品执行试验的人员，以及报告的编制人、审核人和批准人。

• 7. 受试产品的物料清单（BOM）版本。

• 8. 每个样品中所用元器件的来源/物料编号必须可应要求提供。

• 9. 全部试验序列期间下列各项的照片：试验箱布置、样品朝向与安装配置、风道配置，以及 ATE/线缆配置。

• 10. 每个振动序列/每个等级下台面处的 Grms 与功率谱密度（PSD）。

• 11. 下述各项应按序列号提供，用于步进应力试验：

• 试验条件（每个试验序列及每个增量（例如 30 Grms、40 Grms 等）的输入电压、输出负载条件（电压/电流））。负载条件必须清楚显示各输出轨的负载。

• 每个试验序列/增量的试验结果（测得电压/记录任何故障状态）。

• 按受试序列号给出的工作极限与破坏极限的上限和下限。

• 所有温度序列下，试验箱环境温度与产品热响应相对照的热电偶测量综合曲线图和温度日志文件。坐标轴必须为时间和温度。必须在图例中清楚标识热电偶（例如：试验箱环境温度）。

• 产品振动响应，包括每个振动序列/每个等级的 PSD 与 Grms。

• 12. 下述各项应按序列号提供，用于输入电压与输出负载试验（如适用）：

• 电流限值上限和下限。

• 输入电压限值上限和下限。

• 用于输入电压试验的程序设置/总体试验曲线。必须包含电压步长、每个步段期间的开通时间/关断时间、输出负载、温度，以及每个输入电压步段的试验结果（显示输入电压/结果）。必须清楚说明本试验期间温度保护是否被禁用。

• 用于输出电流试验的程序设置/总体试验曲线。必须包含输出负载的步长（以电流表示，而非百分比）、每个步段的单独试验曲线、温度，以及每种输出负载条件下的试验结果（显示输出电流/结果）。负载条件必须清楚显示各输出轨的负载。

• 必须清楚说明试验期间输出电流限值和温度保护是否被禁用。

• 13. 对于综合试验，必须按序列号提供下列信息：

• 电流限值上限和下限。

• 输入电压限值上限和下限。

• 每个综合曲线的程序设置，包括温度、振动、输入电压、驻留时间以及各输出轨的负载。

• 必须清楚说明试验期间输出电流限值和温度保护是否被禁用。

• 14. 所有失效的失效汇总报告及闭环纠正措施报告。

• 15. 对于经修复并用于追加试验的产品，按序列号/试验序列提供全部维修的清单。

• 16. 任何一项或多项试验中偏离本文件所规定程序的偏差。

10.2.1.8 根本原因分析与纠正措施

根本原因分析（RCA）是高加速寿命试验（HALT）过程的一个组成部分，用于确定试验中所发现失效的根本原因。HALT 试验期间发现的所有失效均应分析至其根本原因。

• 根本原因分析过程必须形成文件，记录失效模式、失效的确切原因，或者在不确定的情况下记录疑似原因。这宜包括失效分析实验室的结果（如已采用），并附有缺陷部位损伤的照片。

• 供应商应具备失效分析能力，或可利用外部/独立机构来履行此项职责。

在通过根本原因分析过程弄清失效模式之后，可纳入一项纠正措施计划。

• 供应商应负责记录、报告并在必要时对 HALT 期间发现的所有设计和工艺缺陷实施纠正措施。

• 纠正措施的"修复方案"应以因果报告的形式进行汇总，供客户评审。

• 如果供应商决定不修复 HALT 期间发现的某项失效，则应向客户提供详细的论证报告并经其批准。

10.2.2 温度湿度与偏置（THB）

10.2.2.1 目的

THB 试验用于检验潮气诱发的失效，例如导电阳极丝（CAF）、腐蚀和枝晶。

10.2.2.2 样品数量

本试验的最小样品数量 6pcs。

10.2.2.3 试验程序

THB 试验开始时，先在下列条件下对所有单元进行 72 小时的预处理：

• 不通电。

• 环境温度：85 ° C。

• 相对湿度：85%。

THB 试验在下列条件下进行：

• 试验时长：最短 1000 小时。

• 输入电压：额定最大连续输入电压。

• 输出负载：额定最小值。

• 环境温度：额定最高环境温度或 85 ° C，取两者中较小者。

• 相对湿度：85%。

试验期间，应对试验样品进行监控以确认其功能正常。监控可以是连续的，也可以是采样式的，采样频率不得低于每分钟一次。

10.2.2.4 合格判据

试验时间结束时，所有试验样品应进行目视检查，且不得有焊点开裂、腐蚀、枝晶或其他缺陷。

所有试验样品应在试验完成后的 24 小时内通过功能试验。

允许在短于 1000 小时的时间点将样品从试验中取出，对其进行目视检查和功能试验。如果检出失效，则应实施纠正措施并从起点重新开始试验。重新开始的试验可使用新的样品。

10.2.3 高温工作偏置（HTOB）

10.2.3.1 目的

本试验用于发现只有经过长时间工作后才会出现的薄弱环节（而非早期失效）。本试验无意用于试验或证明使用寿命。

10.2.3.2 样品数量

本试验的最小样品数量 6pcs。

10.2.3.3 程序

本试验不进行预处理。

试验样品在下列条件下工作：

• 输入电压：试验开始时输入电压应等于最高额定连续工作电压。一小时后，在第二个循环中，输入电压应等于最低额定连续工作电压。此后输入电压应每小时在最高与最低额定连续工作电压之间交替，直至试验完成。

• 输出负载：额定最大值的 95% ± 5%。

• 环境温度：最高额定温度。

• 相对湿度：未规定。

DUT 的输入电源按下列方式在一个小时的周期内开通和关断：

• 开通：42 分钟。

• 关断：1 分钟。

• 开通：1 分钟。

• 关断：1 分钟。

• 开通：1 分钟。

• 关断：1 分钟。

• 开通：1 分钟。

• 关断：1 分钟。

• 开通：1 分钟。

• 关断：10 分钟。

最短试验时间最短 1000 小时。

试验期间，应对试验样品进行连续监控，或以不低于每分钟一次的频次采样监控。

10.2.3.4 合格判据

试验时间结束时，所有试验样品应进行目视检查，且不得有焊点开裂、腐蚀、枝晶或其他缺陷。

所有试验样品应在试验完成后的 24 小时内通过功能试验。

允许在短于 1000 小时的时间点将样品从试验中取出，对其进行目视检查和功能试验。如果检出失效，则应实施纠正措施并从起点重新开始试验。重新开始的试验可使用新的样品。

10.2.4 温度循环试验

10.2.4.1 目的

本试验的目的是发现焊点、粘接界面以及其他因热膨胀系数（CTE）差异而承受应力的部件中的薄弱环节。

10.2.42 样品数量

本试验的最小样品数量 6pcs。

10.2.4.3 程序

温度循环试验应在下列条件下进行：

- 试验样品不通电。
- 环境温度的变化速率应为 5 ° C/min 至 20 ° C/min。
- 对于采用有铅焊料或无铅焊料的器件，在任一温度极限下的驻留时间应为 30 分钟。
- 驻留时间从组件达到热平衡时开始计算，而不是从试验箱达到最终设定点时开始计算。
- 可能需要使用布置在试验样品上的热电偶来确定组件达到热平衡所需的时间。
- 最少循环次数 700 次。
- 温度极限是最低额定贮存温度至最高额定贮存温度。

10.2.4.4 监控

DUT 应按下表所示的下列间隔取出。

温度循环试验的检查周期	
1	150 个循环
2	300 个循环
3	450 个循环
4	600 个循环
5	700 个循环

在每个检查周期需进行下列试验与分析：

• 1. 功能确认：在给定的试验环境中尽可能全面地确认其工作状况。强烈建议采用完整的 ATE 或等同于生产的试验。

• 2. 目视与显微检查：目视检查要求 10 倍或更大的放大倍率。显微检查应在关键区域进行，或在目视检查后认为必要时进行。检查项目包括：

• 元件有无损伤或分层

• PCB 分层（常表现为 PCB 材料中颜色较浅的区域）

• 开裂的焊点

• 3. 破坏性分析：该分析必须 700 个循环结束时进行。作为应急方案，如果在任一检查周期的第 2 项中发现开裂迹象，也应进行破坏性分析。可能需要增加样品，以确保满足 10.2.4.3 中所规定的本试验最小样品数量。需进行的破坏性试验包括：

• a. 焊点切片

• 对第 2 项中可见开裂的任何焊点进行

• 对关键元件的焊点进行，包括大型表面贴装（SMT）元件、QFN 或其他具有隐藏焊点的元件，以及表贴晶振

• 任一焊点的开裂均不得超过该焊点的 90%

• 本试验在 700 个循环结束时至少在一个试验样品上进行

• b. 染色与撬离试验（dye-and-pry）

• 对关键元件的焊点进行，包括 QFN、CSP、BGA 或其他具有隐藏焊点的元件，以及带状、J 形引线或类似引线类型

• 本试验在 700 个循环结束时至少在一个试验样品上进行

10.2.4.5 合格判据

所有试验样品应在 700 个循环结束时通过目视和功能试验并进行破坏性分析：

如果检出失效，则应实施纠正措施并从起点重新开始试验。重新开始的试验可使用新的样品。

10.2.5 功率与温度循环（PTC）试验

10.2.5.1 目的

本试验的目的是发现在工作条件各角点处暴露出来的产品薄弱环节。

10.2.5.2 样品数量

本试验的最小样品数量 3pcs。

10.2.5.3 程序

功率与温度循环试验应在下列条件下进行：

• 输入电压：最大连续额定值。

• 输出负载：额定最大值的 50%。

- 最少循环次数为 15。
- 最少单元-循环数为 300。（一个单元-循环是指一个单元完成一次温度和功率循环）
- 最低和最高试验温度为最低和最高额定工作温度。

每个温度和功率循环由七个步段组成。

功率与温度循环试验所需步段	功率	温度
1	开通	从最低升至最高
2	开通	在最高温度驻留 30 分钟
3	关断/开通	在最高温度下进行 1 次功率循环
4	关断	从最高降至最低
5	关断	在最低温度驻留 30 分钟
6	开通	在最低温度下开机
7	返回第 1 步循环	

10.2.5.4 合格判据

试验时间结束时，所有试验样品应进行目视检查，且不得有焊点开裂、腐蚀、枝晶或其他缺陷。

所有试验样品应通过功能试验。

允许在短于最短时间的时间点将样品从试验中取出，对其进行目视检查和功能试验。如果检出失效，则应实施纠正措施并从起点重新开始试验。重新开始的试验可使用新的样品。

10.2.6 冲击与振动

10.2.6.1 目的

冲击与振动试验旨在提供一定的保证：产品在正常的搬运、运输和使用过程中不会受到损伤或性能退化。

10.2.6.2 试验概述

冲击与振动试验用于为被试样品模拟下列环境：

- 安装在最终应用中的器件（工作状态的冲击与振动）。

- 处于运输包装中并被搬运的器件，例如在制造过程或现场服务作业中（非工作状态）
- 处于运输包装中被搬运的器件，例如在装货或卸货作业期间（非工作状态，跌落试验）。
- 处于运输包装中并被运输的器件（非工作状态）。

这些试验在方法和严酷程度方面彼此不同。

10.2.6.3 试验顺序

本节中的每项试验均应视为独立的试验。各项试验可按供应商方便的任意顺序进行。

允许（但不要求）对每项冲击和振动试验使用不同的实物样品。

10.2.6.4 合格判据

除下文另有规定外，所有试验样品应在试验结束时通过功能试验。除试验结束时的功能试验外，某些试验可能要求在试验期间对试验样品进行监控。如果要求监控，则在试验期间应对每个试验样品的电源和信号输出进行连续监控。试验样品应在整个试验期间按规格工作。不允许以大于 1 毫秒的周期进行采样。

10.2.6.5 试验设备

振动和冲击试验应使用电动振动台或具备频率能力的液压振动台进行。作为替代，冲击试验也可使用能够准确产生冲击脉冲的机械冲击系统进行。

10.2.6.6 安装

DUT 应按 IEC 60068-2-27《环境试验 第 2-47 部分：试验—振动、冲击及类似动态试验的样品安装》安装到振动台台面上。

10.2.7 随机振动—工作状态

10.2.7.1 目的

本试验的目的是提供保证：产品在正常工作期间遇到的振动中能够不中断且不退化地工作。

10.2.7.2 样品数量

最少样品数量 3pcs。

10.2.7.3 试验方法

应按 IEC 60068-2-64《环境试验 第 2 部分：试验方法—试验 Fh：振动、宽带随机（数字控制）及导则》中所述的方法进行试验。

每个试验样品应在三个轴向上进行试验，每个轴向至少 30 分钟。应在整个试验期间以标称输入电压通电并空载。关于工作振动试验，频率和加速度谱密度关系见下表，总加速度约为 2.4g rms。

频率	加速度谱密度
Hz	(m/s2)2/Hz
10	0.1

30	2
200	2
500	0.2
Grms = 2.40	

10.2.7.4 合格判据

试验期间应对每个试验样品的电源和信号输出进行连续监控。不允许以大于 1 毫秒的周期进行采样。

试验样品应在整个试验期间按规格工作。

10.2.8 随机振动—非工作状态

10.2.8.1 目的

本试验的目的是提供保证：处于运输包装中的产品在运输过程中不会受到损伤或性能退化。

10.2.8.2 样品数量

最少样品数量 3pcs，以其装满产品的散装运输包装或产品的单独包装形式包装。

10.2.8.3 试验方法

应按 IEC 60068-2-64《环境试验 第 2 部分：试验方法——试验 Fh：振动、宽带随机（数字控制）及导则》中所述的方法，并采用本文件给出的加速度谱密度曲线进行试验。

本试验中产品处于运输包装内。关于非工作振动试验，频率和加速度谱密度关系见下表，总加速度约为 3.8g rms。

频率	加速度谱密度
Hz	(m/s2)2/Hz
5	5
200	5
500	0.3
Grms = 3.80	

每个运输包装应在三个轴向上进行试验，每个轴向至少 30 分钟。

10.2.8.4 合格判据

在三个轴向的试验全部结束时，产品应开箱并进行目视检查，查看有无任何损伤迹象。仅允许不影响外形、配合或功能的轻微外观损伤。不允许出现连接器针脚弯曲、开关损坏、把手损坏、标签可读性受损，或钣金件弯曲或变形。

所有试验样品还应通过功能试验。

10.2.9 冲击——工作状态

10.2.9.1 目的

本试验的目的是提供保证：产品在正常工作期间遇到的冲击中能够不中断且不退化地工作。

10.2.9.2 样品数量

最少样品数量 3pcs。

10.2.9.3 试验方法

应按 IEC 60068-2-27《环境试验 第 2.27 部分 试验 Ea 及导则：冲击》中所述的方法进行试验。

每个试验样品应在三个轴向的每个轴向上承受三次冲击。每次冲击的幅值应不小于 30 g，波形为半正弦波，持续时间为 11 ms。

10.2.9.4 合格判据

试验期间应对每个试验样品的电源和信号输出进行连续监控。不允许以大于 1 毫秒的周期进行采样。

试验样品应在整个试验期间按规格工作。

10.2.10 自由跌落

10.2.10.1 目的

本试验的目的是提供保证：无包装产品在搬运和不当搬运过程中不会受到损伤或性能退化。

10.2.10.2 样品数量

最少样品数量 3pcs。

10.2.10.3 试验方法

应按 IEC 60068-2-32《环境试验 第 2.32 部分 试验 Ed：自由跌落，程序 1》中所述的方法进行试验。

试验样品应在使其跌落之前，以保持正常朝下的一面朝下的方式持住。跌落高度应为 100 mm。

10.2.10.4 合格判据

自由跌落试验结束时，应对装置进行目视检查，查看是否存在任何损坏迹象。仅允许不影响外形、配合或功能的轻微外观损伤。不允许出现连接器引脚弯曲、开关损坏、把手损坏、标签可读性受损，或钣金件弯曲或变形。试验样品还应通过功能试验。

10.2.11 跌落试验

10.2.11.1 目的

本试验的目的是确保产品在其运输包装内，在正常搬运或不当搬运过程中不会受到损坏或性能劣化。

10.2.11.2 样品数量

最少样品数量应为一个完整的运输包装箱。每个样品应由该产品的最小运输包装箱组成，且箱内装满产品。

10.2.11.3 试验方法

该试验方法旨在表明，产品以任何可能的方式跌落和坠落时都不会受到损坏。本试验明确无意表明包装后的产品能够在经受大量跌落的情况下不发生损坏或性能劣化。

样品应在以下各部位各跌落 1 次：

- 每个面（6 次跌落）。
- 每条棱（12 次跌落）。
- 每个角（8 次跌落）。

对于总重量 ≤46 kg 的单件包装，跌落总次数为 26 次。

对于总重量 ≤32 kg 的单件包装，跌落高度应为 1 m。对于总重量 >32 kg 但 ≤46 kg 的单件包装，跌落高度应为 0.5 m。

托盘装载件应从 0.125 m 高度跌落 6 次，另加从 0.25 m 高度跌落 1 次。全部七次跌落都应只跌落在托盘的底面上。

对于单件包装，允许在 13 次跌落之后将产品换入新的包装。这与试验意图一致，即测试包装可能以各种方式坠落，而非对包装进行耐久性试验。

10.2.11.4 合格判据

若有任何证据表明产品已受到损坏，应停止试验。此类证据的一个例子是包装内有松动元件晃动发出的声响。如果在完成 26 次跌落之前停止试验，应对包装和产品进行失效分析并采取纠正措施。随后应从头重新开始试验。

如果完成全部 26 次跌落且没有证据表明产品已受到损坏，则取出样品，包装内的所有 DUT 均应：

- 目视检查是否存在会影响产品完整性、可靠性或安全性的损坏或变形。
- 进行相应的耐压（hi-pot）试验。
- 进行功能试验。

所有试验样品必须通过所有这些试验，方可视为本次试验通过。

10.3 软件（固件）测试

PDB 产品级功能测试

托盘系统级功能测试?

10.4 EMC 和其他测试

必须满足 IPC-9592B 第 5 章第 3 节中规定的 EMS 测试要求，主要包括连续波、辐射抗扰度、传导电快速瞬变脉冲群抗扰度、浪涌抗扰度、振铃波抗扰度、静电放电测试、电磁发射、声学噪声、安规等测试。

10.5 制造符合性测试

必须满足 IPC-9592B 第 7 章中规定的制造符合性测试要求。

11 合规性

产品必须符合主管机构采用的所有适用标准与技术规范，以及可支持全球部署的环保法规。参见：字节合规要求 TBD。

覆盖国家 / 地区清单：包括但不限于 TBD。

供应商责任：产品须标注供应商公司商标或品牌名称。任何例外情况，均须经本项目指定的合规经理确认并批准。

11.1 测试与认证

○ 确保产品遵守与危害健康及环境的物质、材料相关的适用法律、法规、规范及指南。

○ 验证产品在其预定工作环境下完全合规。

○ 产品须由经认可的测试实验室开展测试。

○ 如要求在目标国家本地测试，需采取措施在测试期间保护产品机密。供应商须与选定的认可测试实验室签订保密协议（NDA）。

○ 确保工厂资质状态良好，并按认证机构规定接受定期检查 / 审核。

○ 核验产品满足所有法规标识与标签要求。

○ 满足字节电磁兼容（EMC）设计要求。

○ 满足字节安全设计要求。

○ 满足环境及限制有害物质相关法规。

11.2 合规文件资料

○ 保存并更新产品测试报告与证书，以满足当前及未来法律法规要求。

○ 保证产品认证持续有效，包括因标准或法规变更所需的复审认证或复测。

○ 保证产品持续符合新增或修订的法律法规要求。产品一经认证，未经字节事先书面批准，供应商不得对产品进行任何变更。

○ 向字节提供全部所需认证对应的适用测试报告、证书、注册文件副本，以及法律要求的符合性声明。

字节将评估偏离上述批准范围的情况；所有偏离项必须由供应商与字节双方确认并达成一致。

11.3 环境合规

供应商负责确保产品设计符合环境合规文件 TBD 中的全部要求。