



深圳市谱磁科技有限公司 | SHENZHEN PROMAGTECH CO.,LTD.

技术应用文章 · www.promagtech.com

1 MHz / 3.3 kW 半桥 LLC 2合1 矩阵平面变压器

面向 800V HVDC AI 数据中心电源 ($\pm 400V \rightarrow 50V$ DCX 级) 的设计概览

项目	内容
文件名称	1 MHz 3.3 kW 2合1 矩阵平面变压器 — 技术应用文章
应用场景	800V HVDC AI 数据中心, 机柜内 DC-DC ($\pm 400V \rightarrow 50V$) DCX 级
版本 / 日期	CN-1.0 / 2026-06-25
密级	公开 — 技术资料
网站 / 联系	www.promagtech.com · 张勇 · +86 135 3765 8938 · zyong@promagtech.cn

谱磁科技 — 面向 EV、储能、光伏与 AI 数据中心电源的扁平线电感与平面变压器制造商。

0. 适用范围与声明

本文介绍谱磁科技针对 1 MHz、3.3 kW 半桥 LLC 主变压器的设计方法——采用 2合1 矩阵平面结构,面向 800V HVDC AI 数据中心电源的机柜内 DC-DC (DCX) 级。面向评估高频大电流平面磁件的工程师与采购团队。

说明 文中图示与数值为工程设计目标与估算,仅供说明。最终损耗、温升、效率与 AL 公差以各项目送样实测为准;磁芯几何遵循 ELP58/11/38 datasheet,材料磁损 (Pv) 以所选 MHz 级铁氧体损耗曲线复核为准。

关键点

- 面向 800V HVDC AI 数据中心机柜内 $\pm 400V \rightarrow 50V$ DCX 级的 1 MHz、3.3 kW 半桥 LLC 主变压器,采用 2合1 矩阵平面结构。
- 匝比 4:1:两颗 ELP58 级磁芯,每颗原边 2 匝串联、副边 1 匝并联。
- 取磁芯截面 A_e 约 300 mm² 使 1 MHz 峰值磁密约 42 mT;绕组为 2oz、8 层、S-P-S-P 交错。
- 自研磨腿 ELP58 + PLT 实现 <15 mm 低轮廓(磁芯约 10.6 mm、模块约 13–14 mm)。
- 效率目标:变压器约 99%、模块约 97.5–98%(设计目标,送样实测确认)。

1. 应用概述

随着 AI 数据中心走向 800V HVDC,电力以 $\pm 400V$ 分配,并在靠近负载处降压。其中关键的一环是机柜内 DCX 级——把一路 400V 转成约 50V、达数千瓦级,并以高频近谐振实现固定变比、软开关的高效率。磁件的挑战在于:一个在 1MHz 下仍保持高效的低轮廓大电流变压器——这正是扁平线与平面磁件的主场。

什么时候才该用 1 MHz?频率并非越高越好——对一般 3 kW / 800V LLC 变压器,实用频率拐点常在 400 kHz 附近,上到 1 MHz 只会增加损耗与热应力。本文的设计针对的是:当 800V HVDC AI 数据中心要求 <15 mm 低轮廓模块、1 MHz 才值得的特定场景——并用 2合1 矩阵平面结构、扁平线/平面绕组、S-P-S-P 交错与低磁密 (≈ 42 mT) 来控制这一频率代价。



2. 电气规格

参数	取值	说明
输入母线 Vin	400 VDC	±400V 双极的一极；配 650V GaN
拓扑	半桥 LLC + 同步整流	原边方波幅值 = $V_{in}/2 = 200\text{ V}$
输出 Vout	50 VDC	下游由 VRM 再降压
额定功率 Pout	3.3 kW	
额定输出电流	66 A	
开关 = 谐振频率	1 MHz	DCX 近谐振, 固定增益
模块高度	< 15 mm	低轮廓, 嵌入主板
目标效率 (变压器)	≥ 99%	磁芯+铜损; 送样确认
目标效率 (模块)	≥ 97.5%	含 GaN / SR / 谐振腔

表 1 电气规格

3. 拓扑与匝比

两颗低轮廓平面磁芯 (A、B) 组成 2合1 矩阵:原边串联、副边并联,把大输出电流在两颗磁芯间分流,均流更好、轮廓更低。

半桥 LLC 谐振点增益 $M = 1 \rightarrow V_{out} = (V_{in}/2) / N$
 $N = (V_{in}/2) / V_{out} = 200\text{ V} / 50\text{ V} = 4 \rightarrow N_p : N_s = 4 : 1$
 矩阵拆分:A、B 各原边 2 匝 (串联)、副边 1 匝 (并联)

绕组	连接	结果
原边	A、B 各 2 匝, 串联	总 $N_p=4$, 200 V, 每颗 100 V
副边	A、B 各 1 匝, 并联	总 $N_s=1$, 66 A, 每颗 33 A
总匝比	(2+2) : 1	4 : 1

表 2 2合1 矩阵连接

4. 磁密设计

每匝电压由匝比固定 ($200V \div 4 \text{ 匝} = 50V/\text{匝}$)。峰值磁通与磁密可直接推导;磁芯截面 A_e 按控制 1MHz 磁损来选。

每匝峰值磁通 $\Phi_{pk} = (\text{每匝电压}) / (4 \cdot f_s) = 50 / (4 \times 10^6) = 12.5 \text{ uWb}$

峰值磁密 $B_{pk} = \Phi_{pk} / A_e$

取 $A_e = 300 \text{ mm}^2$ (ELP58 级) :

$B_{pk} = V_{core} / (4 \cdot f_s \cdot N_{core} \cdot A_e) = 100 / (4 \times 10^6 \times 2 \times 300 \times 10^{-6}) = 41.7 \text{ mT}$

目标 B_{pk}	所需 A_e /磁芯	说明
50 mT	$\geq 250 \text{ mm}^2$	上限
42 mT	$\geq 300 \text{ mm}^2$	设计选点

表 3 磁密 vs 磁芯截面 (50V/匝, 1MHz)

4.1 磁芯与材料

参数	取值	说明
磁芯	ELP58/11/38 (E58/11/38)	平面 E 芯, 按 datasheet
有效截面 A_e	308–310 mm^2	-> 每颗 2 匝时 $B_{pk} \approx 40.6 \text{ mT}$
有效体积 V_e	25,000 mm^3 / 对	两颗 = 50,000 mm^3
中柱	8.1 × 38.1 mm	= 308 mm^2
材质	MHz 级低损耗锰锌铁氧体 (3F46 类)	1MHz 不用纳米晶
气隙 / AL	中柱 ~0.2 mm -> AL $\approx 1500 \text{ nH}$	仅中柱开气隙

表 4 ELP58/11/38 关键数据 (Ferroxcube / EPCOS datasheet)

5. 谐振腔 ($L_m / L_r / C_r$)

元件	取值	依据 / 说明
L_m 励磁电感	12 μH	由 ZVS 定; $I_{m,pk} \approx 4.2 \text{ A}$
L_r 谐振电感	2 μH	$L_n = L_m/L_r = 6$, $Q \approx 0.3-0.5$
C_r 谐振电容	$\approx 12.7 \text{ nF}$	由 $f_r=1\text{MHz}$ 反算; COG/NP0, $\geq 630 \text{ V}$

表 5 谐振腔参数

$C_r = 1 / ((2\pi \cdot f_r)^2 \cdot L_r) = 1 / ((2\pi \times 10^6)^2 \times 2 \times 10^{-6}) \approx 12.7 \text{ nF}$

$I_{m,pk} = (V_{in}/2) \cdot (T/2) / L_m = 200 \times 0.5 \times 10^{-6} / 12 \times 10^{-6} \approx 4.2 \text{ A}$ (ZVS)

由于强交错会把漏感压到很低,谐振电感 L_r 采用独立低轮廓平面电感 ($2 \mu\text{H}$ 、 $\sim 18.5 \text{ A rms}$ 、 1 MHz) 实现,而非集成漏感。

6. PCB 绕组叠层

绕组为 8 层平面子板,嵌入主板。ELP58 窗口宽 ($\approx 21 \text{ mm}$),铜箔可做宽,故 4 层副边并联即可承载每颗 37 A ,电流密度均衡。

1MHz 趋肤深度 $\delta = 66/\sqrt{f(\text{Hz})} \approx 0.066 \text{ mm}$ ($66 \mu\text{m}$)
 -> 2oz 铜 ($\approx 70 \mu\text{m} \approx 16$) ; 大电流靠多层并联,不靠加厚单层
 -> S-P-S-P 强交错,打碎 MMF 阶梯,压邻近效应

层	功能	匝 / 并联	电流	说明
L1 (Top)	副边 S	1匝 / 4层并联之一	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	顶层汇流,近 SR FET
L2	原边 P-turn1 (a)	turn1 / 2层之一	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	高压入线
L3	副边 S	并联	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	
L4	原边 P-turn2 (a)	turn2 / 2层之一	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	t1→t2 埋孔串联
L5	原边 P-turn2 (b)	turn2 // L4	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	
L6	副边 S	并联	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	
L7	原边 P-turn1 (b)	turn1 // L2	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	
L8 (Bot)	副边 S	1匝 / 4层并联之一	$\sim 9.3 \text{ A/层}$	底层汇流

表 6 8层变压器子板 (每颗磁芯窗口; A/B 相同)

汇总:副边 = L1/3/6/8 (4 层并联=1 匝, $37 \text{ A} \rightarrow \sim 9.3 \text{ A/层}$) ;原边 turn1 = L2//L7、turn2 = L4//L5, 串联 2 匝。全层 2oz 铜,板厚 $\approx 1.4\text{--}1.8 \text{ mm}$ 。1MHz 下目标 $R_{ac}/R_{dc} \leq 1.4$ (FEA 验证)。副边汇流过孔几何轴对称,保证均流。

7. 损耗预算 (设计目标)

7.1 变压器

损耗项	估值	说明
磁芯损耗	$\sim 12\text{--}15 \text{ W}$	1MHz 铁氧体 @ $\sim 40 \text{ mT}/1\text{MHz}/100^\circ\text{C}$, $V_e=50 \text{ cm}^3$ (两颗)
原边铜损	$\sim 7\text{--}10 \text{ W}$	$I_{p,rms} \approx 18.5 \text{ A}$
副边铜损 + 过孔	$\sim 8\text{--}12 \text{ W}$	每颗 $\sim 37 \text{ A rms}$, 4 层并联
变压器合计	$\sim 27\text{--}37 \text{ W}$	$\rightarrow \sim 99\%$ (目标,送样确认)

表 7 变压器损耗预算

7.2 模块

损耗项	估值	说明
变压器	~30 W	见 7.1
谐振电感 + Cr ESR	~6–8 W	
原边 GaN (导通+1MHz 开关)	~10–20 W	
副边同步整流 (66 A)	~15–25 W	
模块合计	~65–90 W	→ ~97.5–98% (目标)

表 8 模块损耗预算

8. 热设计

双面传导:磁芯底面经 $\geq 6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 导热垫贴至冷板;顶面与副边 SR FET 由铝散热片风冷。

导热垫热阻 $\theta = t/(k\cdot A) = 1\times 10^{-3} / (6 \times 44\times 10^{-4}) \approx 0.04 \text{ K/W}$

→ 30W 仅 ~1.2 K 压降; 热点由磁芯内部与副边铜决定

- 副边并联层过孔几何轴对称,保证均流、避免局部热点。
- 冷板 60°C 时,变压器热点处于铁氧体与高 Tg PCB 限值内 (送样以红外/热电偶确认)。

9. 低轮廓磁芯 — 自研磨腿 ELP58 + PLT

为满足 <15 mm 模块限高,谱磁自研磨腿工艺:把 ELP58 磁芯腿磨至所需窗高,同时保留轭与外柱截面——磁密与 1MHz 磁损不变。以标准 PLT58/38/4 平板闭合磁路。

项	取值	说明
磨后 E 半高	≈ 6.55 mm	保留轭 + 腿磨至窗高 ~2.5 mm
PLT58/38/4 平板	≈ 4.0 mm	标准闭合平板
磁芯高度 (E + PLT)	≈ 10.6 mm	低轮廓
8 层子板	≈ 1.8 mm	窗内留 ~0.7 mm 作灌封/公差
模块高度	≈ 13–14 mm	含导热垫 + 散热片 → < 15 mm
占板	≈ 60 × 80 mm	两颗磁芯 + 谐振电感 + SR

表 9 低轮廓堆叠 (磨腿 ELP58 + PLT)

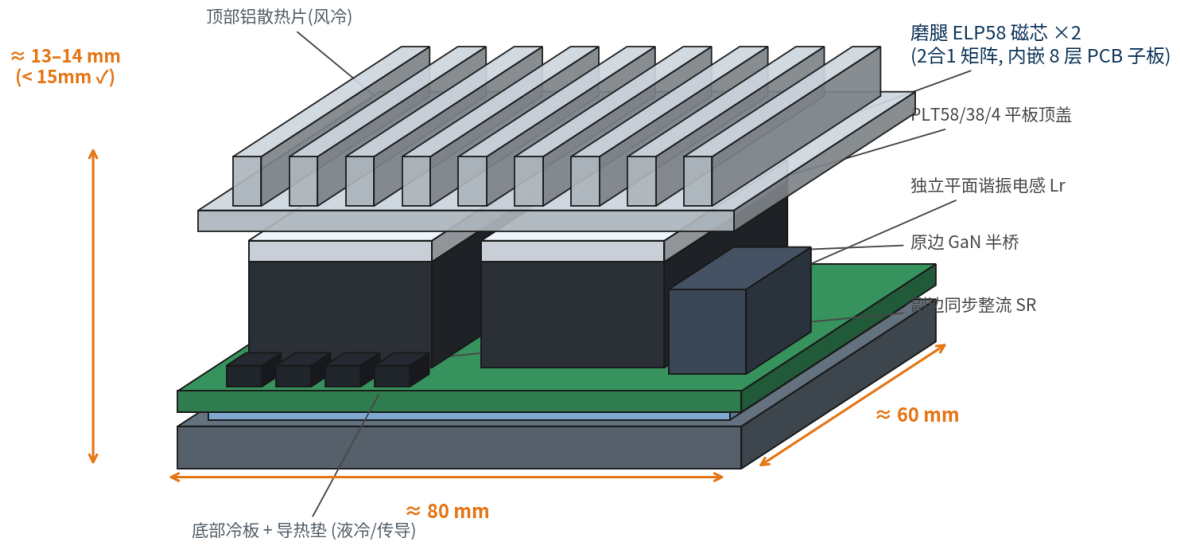
工艺优势 自研磨芯让谱磁能同时以紧密、可重复的公差控制低轮廓高度与中柱气隙 (AL) ——磨面即气隙/贴合面,批间 AL 离散可控 (目标 $\pm 5\%$)。

10. 结构视图

下图为整机装配、侧视堆叠与俯视布局示意。仅供示意,最终以结构图纸为准。

图 9-1 成品立体外观示意 (2合1 矩阵平面变压器功率模块)

注:为清晰起见 Z 向按比例放大;实际为低轮廓薄型模块。



示意图;为清晰起见 Z 向按比例放大,实际为低轮廓薄型模块。

图 9-2 侧视高度堆叠

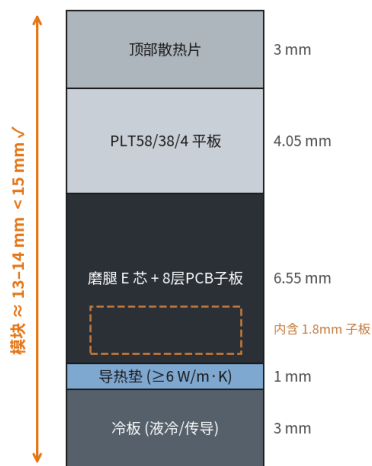
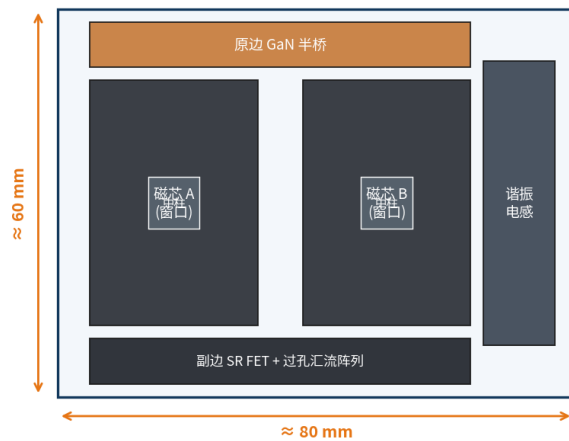


图 9-3 俯视布局(占板 $\approx 60\times 80\text{mm}$)



左:侧视高度堆叠 (磨腿 E+PLT,模块 $\approx 13\text{--}14\text{ mm}$) ; 右:俯视占板 $\approx 60\times 80\text{ mm}$ 。

11. 验证与测试

每个设计在送样前都经过结构化验证:仿真确认磁与热设计,实测在硬件上确认真实性能。

验证项	方法 / 设备	判据
磁密 Bpk	磁性 FEA + 送样测 AL	$\leq 50 \text{ mT}$
交流铜阻 Rac	FEA + 阻抗分析仪	$R_{ac}/R_{dc} \leq 1.4 @ 1 \text{ MHz}$
谐振 Lm / Lr / Cr	精密 LCR / 网络分析仪	$f_r = 1 \text{ MHz} \pm 3\%$
磨芯 AL 一致性	抽样 LCR	$AL 1500 \text{ nH} \pm 5\%$
ZVS	示波器 + 高压差分探头	全负载 ZVS
效率	高精度功率分析仪	满载达标
温升 / 热点	热电偶 + 红外, 冷板	处于磁芯与 PCB 限值内
副边均流	红外成像 / 分层测流	无局部过热
绝缘 / 耐压	Hipot + 绝缘电阻	按规范通过
尺寸 / 装配	实测堆高	$< 15 \text{ mm}$

表 10 验证清单

12. 制造与品质

- **绕组工艺:**扁平线 (edge-wound) 与多层平面 PCB 绕组,低 DCR、低 AC 损耗、高电流密度。
- **自研磨芯:**低轮廓磁芯成形与中柱气隙,AL 公差可控。
- **材料:**MHz 级低损耗锰锌铁氧体、高 Tg PCB、COG/NP0 谐振电容、适配 650V GaN 的版图。
- **检验范围:**电感、DCR、直流偏置、漏感、匝比、Hipot 与绝缘电阻,按认可样品记录执行。

13. 常见问题 (FAQ)

什么是 2合1 矩阵平面变压器？

用两颗低轮廓平面磁芯,原边串联、副边并联,把大输出电流在两颗磁芯间分流,实现均流、低直流电阻与低轮廓,适合高频 LLC / DCX 变换器。

为什么 800V HVDC 的 DCX 变压器要用 1 MHz?

在 1 MHz 附近可显著缩小磁件、实现低轮廓模块,同时近谐振软开关 (ZVS) 保持高效;代价是交流铜损与磁损上升,靠扁平线/平面绕组、交错叠层与低磁密控制。

1 MHz 下如何控制磁密?

每匝电压由匝比固定,故每匝峰值磁通固定; $B_{pk} = \text{磁通}/A_e$ 只取决于磁芯截面。取 A_e 约 300 mm² (ELP58 级) 得 B_{pk} 约 42 mT,把 1 MHz 磁损控制住。

模块如何压到 15 mm 以内?

谱磁自研磨腿工艺,把 ELP58 磁芯腿磨到所需窗高、保留轭与外柱截面,再以标准 PLT 平板闭合;磁芯约 10.6 mm、模块约 13–14 mm,磁密与磁损不变。

1 MHz 3.3 kW LLC 平面变压器能达到多少效率?

设计目标:变压器本体约 99%、整机模块约 97.5–98%;均为工程估算,以送样实测为准。

谱磁能定制平面变压器与扁平线电感吗?

可以。谱磁科技 (深圳,2013 年成立) 研发制造扁平线电感、平面变压器、共模电感与 PFC 电感,具备自研磨芯工艺与明确检验范围,可提供样品与工程评审。

14. 术语

800V HVDC — 高压直流配电 ($\pm 400V$ 双极或 800V 单极),用于 AI 数据中心机柜以降低电流与铜损。

DCX — 固定变比直流变压器级,通常为近谐振 LLC,效率高且与负载无关。

平面变压器 — 绕组为 PCB 铜层、绕在扁平铁氧体磁芯上的变压器,低轮廓、AC 电阻可重复、散热好。

扁平线 (edge-wound) 绕组 — 矩形铜带立绕,铜填充高、DCR 低、大电流下温升低。

ZVS — 零电压开关——降低开关损耗的软开关,LLC 中由励磁电流实现。

15. 参考

- Open Compute Project — 800V DC 数据中心电源架构演进 (opencompute.org) 。
- Ferroxcube — E58/11/38 平面磁芯与 3F46 材料 datasheet (ferroxcube.com) 。



- 谱磁科技 — 扁平线 vs 圆线电感、平面变压器与 800V 平台选型指南 (promagtech.com/technical-resources) 。

16. 关于谱磁

深圳市谱磁科技有限公司（成立于 2013 年,位于深圳市光明区）研发与制造功率磁性元件——扁平线电感、平面变压器、共模电感与 PFC 电感——广泛用于 EV 车载充电与直流充电桩、储能 PCS、光伏逆变器、工业电源与 AI 数据中心电源。

联系方式: 张勇 · +86 135 3765 8938 · zyong@promagtech.cn · www.promagtech.com

© 2026 深圳市谱磁科技有限公司 版权所有。文中数值为设计目标/估算;最终性能以各项目送样实测为准。