



URL slug: /technical-resources/ai-psu-llc-planar-transformer-guide.html

页面标题: AI PSU LLC 谐振平面变压器技术详解: 漏感复用、磁集成、低剖面 | 谱磁科技

页面描述: AI 算力服务器电源(AI PSU)48V/12V LLC 谐振变换器为何首选平面变压器: 多层PCB绕组+扁平铁氧体磁芯,漏感复用为谐振电感Lr,磁集成、低剖面、高频低损。含磁芯/绕组/电气参数对比表、应用场景与FAQ。参数为行业公开参考值,需按项目确认。

核心关键词: LLC 平面变压器 / AI PSU 变压器 / 48V转12V 平面变压器

延伸关键词: 谐振漏感复用, 磁集成 Lm Lr, PCB绕组交错, 低剖面变压器, 高频铁氧体, OAM 电源磁件

技术指南 / AI PSU 平面变压器

## AI PSU LLC 谐振平面变压器技术详解

漏感复用为谐振电感、磁集成、低剖面——为什么 AI 算力电源选平面变压器

### 一、核心结论

AI 算力服务器电源(AI PSU)的 48V→12V 核心 DC-DC 普遍采用 LLC 谐振拓扑。在 500kHz 以上的高频工况下,传统漆包线绕制变压器受集肤效应、邻近效应、漏感不可控、散热差、体积大所限,难以满足高密度低剖面要求。平面变压器(多层 PCB 蚀刻绕组 + 扁平铁氧体磁芯)成为更优解,其价值可归纳为四点:

- 一句话结论: 1. 漏感复用:平面结构的漏感可控,可直接复用为 LLC 谐振电感 Lr,省去外置谐振电感,提升集成度。
2. 磁集成:励磁电感 Lm 与谐振漏感 Lr 一体化集成,减少器件数量,简化谐振腔设计。
3. 低剖面高密度:PCB 绕组+扁平磁芯天然薄,Z 向散热路径短,适配砖式/OAM 低剖面封装。
4. 量产一致性:PCB 蚀刻自动化使绕组参数离散显著低于手工绕线,利于多模块并联均流。

以下各节给出结构设计、磁芯与绕组方案、电气参数参考范围、应用场景与常见问答。文中所有参数均为行业公开或常规工程参考范围,具体取值须按项目拓扑、功率与封装实测确认,不作为产品额定承诺。

### 二、核心结构设计

平面变压器器件通常由磁芯组件、PCB 多层绕组、绝缘与屏蔽层、导热基座、定位封装五部分组成。其中磁芯选型与 PCB 绕组层叠是决定 LLC 适配性的关键。

#### 2.1 磁芯选型 (按功率分类)

表 2-1 平面磁芯类型与 LLC 适配 (参考性分类)

磁芯类型	适配功率范围	LLC 适配优势	典型 AI PSU 场景
EE 型平面磁芯	中小功率	气隙调节便捷,Lm 可调范围宽,适配半桥 LLC	单路 AI 卡辅助电源、边缘算力电源
PQ 扁平磁芯	中大功率	低剖面、磁通对称,散热面大,漏感一致性较好	主服务器 48V→12V 大功率 LLC
矩阵集成磁芯	大功率	多绕组磁通抵消,均流性好,可磁集成谐振电感	机架式 AIDC 集群集中供电

(功率分档为定性参考,实际边界随拓扑、频率、散热方案差异很大,须按项目确认。)

磁芯材料一般选用高频铁氧体(如 PC95/PC96 等级,适用约 200kHz~1MHz)与超高频材料(约 1MHz~3MHz)。饱和磁通密度 Bs 及高频损耗 Pcv 等参数请以所选牌号厂商数据手册为准,并按真实工况(波形、偏置、温度)校核——参见我们关于磁芯损耗与数据手册偏差的专文。



## 2.2 PCB 绕组层叠 (LLC 交错排布)

LLC 平面变压器普遍采用初级-次级交错(P-S-P-S)层叠,核心目的有三:

### P-S-P-S 交错层叠的 3 个作用

- ▶ **提高耦合、控制漏感** — 交错排布最大化原副边耦合,使漏感可控并精准复用为 LLC 谐振电感  $L_r$
- ▶ **降低层间寄生电容** — 分段/扇形绕组降低层间电容,抑制 LLC 高频共模干扰与谐振尖峰
- ▶ **改善高频损耗** — 铜箔厚度匹配集肤深度(如 1MHz 下铜趋肤深度约  $66\mu\text{m}$ ),规避高频涡流损耗

铜箔厚度通常在 1oz(约  $35\mu\text{m}$ )~3oz(约  $105\mu\text{m}$ )区间,按工作频率的集肤深度选择;次级低压大电流侧常用多 PCB 层并联以降低直流电阻并均流。

## 2.3 磁集成特色

通过内置分布式磁分路/气隙,可将励磁电感  $L_m$  与谐振漏感  $L_r$  一体化集成,无需独立谐振电感。气隙精度直接影响批量参数一致性与多模块并联均流,是平面变压器量产的关键工艺控制点之一。

## 三、关键电气参数 (行业公开参考范围)

下表汇总 AI PSU LLC 平面变压器的常见电气参数参考范围。请注意:所有数值均为行业公开或常规工程参考区间,用于选型方向判断,不代表任一具体产品的额定值,最终须按项目确认。

表 3-1 LLC 平面变压器电气参数参考范围

参数项	参考范围	设计约束/说明
工作频率	约 200kHz~3MHz	Si 方案常 $\leq 500\text{kHz}$ , GaN 方案常 $\geq 1\text{MHz}$
匝数比 $N_p:N_s$	视增益与电压比	48V $\rightarrow$ 12V 常用 4:1 附近,匹配 LLC 增益
励磁电感 $L_m$	按拓扑设计	与 $L_r$ 之比 $k$ 影响轻载 ZVS 与环流损耗
谐振漏感 $L_r$	复用固有漏感	省去外置谐振电感,需控制公差
层间寄生电容	越低越好	交错+屏蔽抑制,利于 EMI
绝缘耐压	按安规要求	初-次级隔离按 IEC 61558 等标准,爬电距离达标
效率区间	高频 LLC 可达较高效率	具体以实测为准,随负载与频率变化
工作温区	常见 $-40^\circ\text{C}\sim 125^\circ\text{C}$	磁芯需高温降额,电感随温漂移

**重要说明:** 上表为参考区间而非产品规格。LLC 平面变压器的实际指标高度依赖具体拓扑、功率等级、封装与散热方案。我们不提供脱离项目工况的「通用额定值」承诺——任何最终参数都应在你的真实工况下确认。

## 四、物理尺寸与封装 (低剖面适配)

AI PSU 对低剖面要求严格(如 OAM 加速模块对电源高度的限制)。平面变压器以扁平结构适配砖式电源封装,常见形态按砖式规格分级,具体尺寸与功率须按项目定义:



### 低剖面封装形态 (参考性分级)

- ▶ **辅助电源级** — 超薄小尺寸,适配单路 AI 卡辅助供电
- ▶ **主功率级** — 砖式封装,受限高约束(如 OAM 高度限制)
- ▶ **集群供电级** — 较大尺寸,面向机架集中供电
- ▶ **矩阵集成级** — 大尺寸磁集成,面向机架规范的多路集成供电

结构公差(磁芯装配、PCB 对位、气隙、整体厚度)直接影响参数一致性与装配贴合,是量产工艺的控制重点。底部通常预留全平面导热焊盘,兼容导热垫与水冷底座,Z 向散热路径短于传统绕线变压器,有利于低剖面下的温升控制。

## 五、 典型应用场景

LLC 平面变压器主要落地于以下 AI 算力供电场景:

表 5-1 典型应用场景与价值

应用场景	角色	平面变压器价值
AIDC 数据中心电源	48V→12V 母线 LLC 转换	低剖面高密度,替代分立磁件,提升集成度
OAM/加速模块配套 PSU	开放加速器模块供电	超薄低剖面,适配高度受限的服务器封装
边缘 AI 算力电源	工业网关/车载域控 LLC 隔离	宽温、抗干扰、隔离可靠
储能协同 AI 电源	800V 储能辅助降压 LLC	高隔离、长时可靠运行

LLC 拓扑配合平面变压器的核心价值在于:全负载 ZVS 软开关降低开关损耗、谐振电感内置减少器件数量、PCB 蚀刻带来高量产一致性、以及内置屏蔽与低寄生电容改善 EMI。各项效果的具体幅度随设计与工况而定,须实测确认。

## 六、 行业技术发展趋势

AI 算力电源的平面磁件正沿几个方向演进:

### 平面变压器的 4 个演进方向

- ▶ **高频化** — 随 GaN/SiC 普及,工作频率向 MHz 级迭代,变压器向更薄演进
- ▶ **磁集成深化** — LLC 变压器 + PFC 电感 + EMI 电感向单磁件多路集成发展
- ▶ **仿真定制** — 基于电磁-热-机械多物理场仿真优化绕组与气隙,缩短迭代周期
- ▶ **高压平台适配** — 面向 800V 储能/车载 OBC 的高压绝缘平面架构成为通用方案

## 七、 常见问答 (FAQ)

### Q1: LLC 为什么适合用平面变压器, 而不是传统绕线变压器?

因为 LLC 需要一个可控的谐振电感  $L_r$ ,而平面变压器的漏感可通过 PCB 交错层叠精确控制,直接复用为  $L_r$ ,省去外置谐振电感;同时平面结构低剖面、散热好、量产一致性高,正好契合高频高密度 AI PSU 的需求。传统绕线变压器在高频下集肤/邻近损耗大、漏感难控、体积厚,适配性差。

### Q2: 平面变压器的漏感复用为 $L_r$ , 公差怎么保证?



漏感由 PCB 层叠几何决定,而 PCB 蚀刻的尺寸一致性远高于手工绕线,因此漏感的批量公差相对可控。但仍需通过层叠设计、气隙精度与工艺管控来锁定公差,并在量产中以测试保证多模块并联时的均流。具体公差应按项目要求确认。

**Q3: 表里的效率、温升这些参数能直接写进我的规格书吗?**

不建议直接照搬。本文参数是行业公开参考范围,用于选型方向判断;你的规格书指标必须基于你的具体拓扑、功率、频率、封装与散热,在真实工况下实测确定。把通用参考值当成产品额定写进规格书,会在客户验证时带来风险。

## 八、 相关资源与联系

### 相关技术资源

主题	链接
数据手册上的磁芯损耗, 在你的工况下是错的	<a href="#">core-loss-datasheet-vs-real-operating-point</a>
800V HVDC 母线电感设计指南	<a href="#">aidc-800v-hvdc-bus-inductor-design-guide</a>
服务器电源功率密度墙	<a href="#">server-power-density-flat-wire-thermal-limit</a>

**联系 ProMagTech:** 深圳市谱磁科技有限公司(SHENZHEN PROMAGTECH CO.,LTD.)为 AI PSU、AIDC 与储能平台设计定制 LLC 谐振平面变压器及功率磁件。

把你的 LLC 设计需求发来——输入/输出电压、功率、开关频率、增益范围、封装高度限制、散热方式与目标效率——我们会基于你的真实工况给出平面变压器方案与可实现的参数,而非通用模板值。

官网:www.promagtech.com

免责声明: 本文所有电气与结构参数均为行业公开范围或常规工程参考值,非任何具体产品的额定值或性能承诺。最终规格须按项目拓扑、功率、封装与散热在真实工况下实测确认。本产品可按客户所在市场的安规要求(如 IEC 61558、UL 62368-1、CE、RoHS 等)定制适配。