



AI 服务器电源 · 技术文章

48V AI数据中心电源： 圆线电感为何触及热极限

高密度48V AI数据中心电源架构中的热瓶颈成因、绕线几何取舍与扁平线电感设计优势深度分析

适用场景：AI数据中心 · 48V服务器电源 · 高密度PSU · POL DC-DC变换器

发布方	深圳市谱磁科技有限公司 (PROMAGTECH)
文件类型	技术文章 — AI服务器电源系列
适用读者	功率电子工程师 · 硬件研发 · 数据中心基础设施工程师
网址	www.promagtech.com
邮件	zyong@promagtech.cn

一、摘要

AI计算基础设施的快速扩张正在推动数据中心电源架构从传统12V配电向48V机架级电源根本性转变。这一转变大幅提升了负载点（POL）变换器的电流密度，对每个电源级核心电感的热性能、电磁性能和生产一致性提出了全新要求。

传统圆线电感越来越难以在不付出代价的情况下满足这些要求。本文深入分析圆线电感在48V AI服务器电源系统中形成热瓶颈的根本原因，并阐述扁平线电感技术如何通过改善窗口填充率、热路径管理和生产一致性来拓展设计裕量。

核心结论： 在48V AI数据中心电源架构中，当电流密度上升且气流受限时，扁平线电感可有效降低热瓶颈。其优势来自几何结构：矩形铜导线能更高效地填充磁芯窗口，缩短热路径，并支持可重复的自动化绕线。

二、48V AI数据中心电源架构

现代AI训练集群需要以前所未有的规模持续供电。单颗GPU或NPU功耗可超过700W，满载服务器机架可超过80kW。传统12V配电在这样的电流水平下会产生过大的 I^2R 损耗。48V架构以4倍电压配送电力，在相同功率下将传导损耗降低16倍——但这将电压转换步骤移至服务器板上，由直接安装的POL DC-DC变换器完成。

2.1 POL电感的典型规格要求

参数	典型48V AI服务器POL要求
输入电压	40–60 V DC (48V标称±20%)
输出电压	0.8–5 V (处理器或内存供电轨)
输出电流	50–200 A/相 (多相VRM)
开关频率	300 kHz – 2 MHz (GaN器件)
电感量	50 nH – 1 μH (取决于频率和纹波)
DCR目标	< 0.5 mΩ (工作温度下)
温升限制	≤ 40°C (高于40°C环境温度)
封装高度	< 5–8 mm (刀片服务器设计)

每个POL电感都工作在气流受导向和约束的紧凑热环境中。它必须在数百万量产单元中同时满足严格的电气、热和尺寸限制，并保持参数一致性。

三、圆线电感的隐性极限

圆线电感在功率电子领域服役数十年。然而在48V AI服务器应用中，其几何和物理特性在高电流密度和高开关频率下形成了明显的设计制约。

3.1 窗口填充率与浪费的磁芯空间

将圆形导体堆叠在矩形磁芯窗口中时，圆截面之间不可避免地留有空气间隙。计入绝缘厚度、绕线张力变化和制造公差后，实际生产中可达到的填充率通常降至55–65%。每一个百分点的窗口面积浪费，都代表着没有参与导流的铜截面积。

工程后果：窗口利用率低意味着：要么增大磁芯（高度更高、体积更大、成本更高），要么用更少匝数的更粗导线。在高度受限的AI服务器布局中，磁芯尺寸根本无法随意增大。

3.2 热死区与局部高温

磁芯窗口内圆形导体之间的空气间隙起到了热绝缘作用。绕组中心产生的 I^2R 热量必须横向穿过这些空气间隙，才能到达磁芯壁或外层绕组表面散热。这导致局部热点的形成——在元件外表面无法通过热电偶观测到的高温区域。

在标准台架测试中，表面测量温度可能显示在可接受范围内，而绕组热中心处的导体实际上可能已比表面热20–30°C。这一差异是圆线电感接近热极限运行时的重大隐性可靠性风险。

3.3 高频下的趋肤效应与邻近效应

在300 kHz至2 MHz的开关频率下，圆形导体的交流电阻远高于其直流电阻，两种电磁现象导致这一差异：

- 趋肤效应：电流集中在导体表面附近。铜在500 kHz时的趋肤深度约为0.093 mm。直径1 mm的导体半径是趋肤深度的5倍以上——高频下大部分内部铜区域处于闲置状态。
- 邻近效应：相邻导体的交变磁场感应出涡流，进一步扭曲电流分布。在紧密绕制的多匝线圈中，邻近效应可使交流电阻比直流电阻高3–10倍。

频率	铜中趋肤深度	与1mm直径导体半径之比	对交流电阻的实际影响
50 kHz	0.295 mm	0.59×（轻微趋肤效应）	约为DCR的1.3–2倍
300 kHz	0.120 mm	0.24×（显著趋肤效应）	约为DCR的2–5倍

频率	铜中趋肤深度	与1mm直径导体半径之比	对交流电阻的实际影响
1 MHz	0.066 mm	0.13× (严重趋肤效应)	约为DCR的5–15倍
2 MHz	0.047 mm	0.09× (导体大部分闲置)	可超过DCR的20倍

3.4 生产一致性问题

小至中等批量生产中的圆线绕制通常依赖半手动工艺，绕线张力、导体间距和层压实程度取决于操作工技术水平。这导致批次间DCR、电感量和从绕组到磁芯的热阻出现波动。在AI服务器电源应用中，数千个相同单元必须在全温度范围内满足严格的性能窗口，生产波动是质量风险，而非单纯的工艺问题。

四、扁平线电感如何拓展设计裕量

扁平铜线绕制并不能消除趋肤效应、邻近效应或热阻的物理规律，但它能让工程师对这些效应发生的位置和严重程度拥有更多的几何控制权。

4.1 窗口填充率：几何优势

矩形铜导体可以在磁芯窗口内同层相邻匝之间几乎零间隙地堆叠，生产中可达到的填充率升至75–88%，而圆线仅为55–65%。

参数	圆线	扁平线	工程收益
典型填充率	55–65%	75–88%	单位窗口面积内更多铜
DCR（相同匝数和磁芯）	基准值	低20–40%	铜损降低，温升下降
Z轴高度	基准值	潜在降低10–25%	更适合高度受限设计
磁芯窗口利用率	较低	较高	相同规格可用更小磁芯

4.2 热路径：连续铜面导热

在扁平线绕组中，相邻匝共享大面积平坦铜面，之间只有薄薄的绝缘薄膜。绕组任何位置产生的热量都可沿铜层横向传导，并通过堆叠层向下传导至磁芯或底板——没有空气间隙阻断这一传导路径。

结果是整个绕组截面温度分布更均匀。在设计合理的扁平线电感中，峰值导体温度与表面测量温度之差，可以比等效圆线设计显著更小。

热设计警告：这一优势依赖于几何结构。绝缘选择不当、散热不足或热界面设计错误的扁平线电感，无法实现这一潜在改善。扁平线提供更好的热几何条件，实际热性能仍须针对变换器波形、气流速率、环境温度和热界面设计进行验证。

4.3 高频损耗：导体厚度与趋肤深度匹配

扁平线可以按照工作频率下约一到两倍趋肤深度来规格化厚度。厚度等于一倍趋肤深度的导体，在该频率下几乎所有铜截面积都参与导流，内部几乎没有被浪费的铜。

开关频率	目标铜厚度（2×趋肤深度）	扁平线收益
300 kHz	0.24 mm（2 × 0.120 mm）	交流电阻接近直流电阻

开关频率	目标铜厚度 (2×趋肤深度)	扁平线收益
500 kHz	0.19 mm (2 × 0.093 mm)	铜截面积高效利用
1 MHz	0.13 mm (2 × 0.066 mm)	薄箔低交流损耗
2 MHz	0.09 mm (2 × 0.047 mm)	超薄多层扁平线或PCB绕组

4.4 生产一致性：自动化绕线

扁平线绕制非常适合自动化成型和绕线工艺。工装和工艺参数验证后，匝间的几何关系由工装固定，而非依赖操作工技术。

- 批次间DCR变化：扁平线工艺可实现±3–5%；手动圆线通常±10–15%
- 电感量变化：一致的填充率减少了导致电感量分散的绕线几何变化
- 热阻：一致的绕线几何产生一致的匝间接触，降低热阻变化

PROMAGTECH生产标准： 采用配备机器视觉检测的自动化扁平线绕制工艺。AI服务器供货项目的生产目标是批次DCR Cpk ≥ 1.33。

五、设计考量与取舍

扁平线电感并非在所有场合都优于圆线设计，选择应基于变换器设计的具体需求。

5.1 扁平线优势最显著的场景

以下情况扁平线通常是更优选择：

- 每相工作电流超过30 A且DCR是约束条件
- 开关频率高于100 kHz且交流电阻对铜损贡献显著
- 封装高度受限，窗口填充效率决定设计能否满足空间要求
- 产量和一致性要求需要自动化绕线而非手动工艺
- 热环境严苛（环境温度 $>70^{\circ}\text{C}$ 或气流受限）
- 需要在给定磁芯体积下最大化饱和电流裕量

5.2 圆线仍可适用的场景

以下情况圆线可能仍然足够：

- 每相电流低于15–20 A且热裕量充足
- 开关频率低于100 kHz，趋肤效应对交流电阻的贡献较小
- 封装高度不受限，磁芯体积可以宽裕设计
- 产量较低（原型/NPI阶段），扁平线工装投资尚不合理
- 匝数多（高匝数低电流），扁平线单匝成本变得过高

5.3 设计评审中的关键参数

参数	规格内容	对选型的影响
电感量及公差	工作偏置下的nH或 $\mu\text{H} \pm\%$	决定匝数和磁芯尺寸
额定电流（有效值）	最恶劣占空比和频率下的A值	导线截面、DCR、温升

参数	规格内容	对选型的影响
峰值/饱和电流	含纹波和瞬态的最大电流A值	磁芯饱和裕量
开关频率	KHz或MHz，固定或可变	趋肤效应、交流电阻
DCR限值	工作温度下最大DCR (mΩ)	铜损、热预算
温升限制	高于环境温度的°C	热路径、填充率
封装尺寸	长×宽×高mm，PCB焊盘	磁芯几何选择
散热方式	自然冷却/强制风冷/底板传导	热设计依据
认证需求	AEC-Q200、UL、RoHS等	材料和工艺约束

六、48V AI数据中心基础设施的应用场景

6.1 48V至输出POL DC-DC变换器

电感在48V AI电源架构中应力最高的应用是为处理器或内存生成供电电压的POL变换器。现代AI加速器在0.7–1.1 V供电电压下可汲取200–1000 A电流。多相VRM每相配备一个电感，每个处理器10–20相，意味着每块服务器板上的电感数量相当可观。

在GaN实现的500 kHz至2 MHz开关频率下，导体厚度与工作频率趋肤深度匹配的扁平线电感，可将交流电阻维持在接近直流电阻的水平，使铜损在多相阵列中保持可预测且一致。

6.2 48V总线PFC和整流级

为48V总线供电的AC-DC变换级通常采用工作在65–250 kHz的PFC前级。在这些频率下，大电流（20–100 A）运行的圆线PFC电感可能面临显著的趋肤效应和邻近效应。针对PFC频率优化的扁平铜线绕组可降低交流损耗，支持更高的电源输入效率，直接减少数据中心的冷却负荷。

6.3 LLC和CLLC谐振变换器

部分48V电源架构采用LLC或CLLC级进行高效率电压转换，利用自然ZVS工作。LLC级中的谐振电感承载近似正弦波电流，对谐振频率处的交流电阻很敏感。导体厚度按谐振频率选定的扁平线绕组，可将这一损耗贡献最小化。

七、向PROMAGTECH提交设计评审

要评估扁平线电感是否适合特定的48V AI数据中心电源应用，请提供以下信息。规格不完整将导致无法反映真实工程最优解的通用回复。

需要提供的信息	所需细节程度
变换器拓扑	Buck、Boost、PFC、LLC、CLLC、多相VRM等
输入和输出电压	最小值/标称值/最大值，含瞬态范围
相电流（有效值和峰值）	每相额定负载和最坏瞬态下的电流
开关频率	固定或可变；可变时提供最小和最大值
目标电感量	标称值和可接受公差（±%）
DCR限值	工作温度下最大DCR（mΩ）
温升限制	高于环境温度的最大ΔT；注明环境温度
封装空间	最大长×宽×高（mm）；已知时提供PCB焊盘
散热方式	自然对流/强制风冷（CFM）/底板传导
数量和计划	原型（pcs）/NPI/量产（pcs/月）
认证需求	AEC-Q200、UL、TUV、IEC、RoHS、REACH

PROMAGTECH响应承诺：收到完整规格后，PROMAGTECH工程团队将在24小时内提供初步设计评估，3个工作日内提供正式设计方案或报价。

八、常见问题解答

Q1：本文中的性能数据可以直接用于量产吗？

不可以。所有数据均为工程参考值和示意性范围。实际量产值取决于具体磁芯几何形状、绕线配置、导体尺寸、绝缘系统、工作波形、冷却设计和热环境。量产值必须通过批准样品、工作偏置下的电气测量、额定电流下的热验证和耐压测试，在量产发布前逐一确认。

Q2：扁平线在48V AI服务器电感中是否总是优于圆线？

并非如此。扁平线优势在高电流密度、高开关频率和封装高度受限时最为显著。在较低电流（每相低于约15 A）和较低频率（低于约100 kHz）下，几何优势可能不足以抵消更高的元件成本或小批量项目的工装投资。选择应基于具体工作点和成本预算。

Q3：扁平线如何影响电感的饱和电流（ I_{sat} ）？

I_{sat} 主要由磁芯材料、磁芯几何形状、匝数和气隙决定，不直接受导线截面几何形状影响。但由于扁平线实现了更高的填充率，可以在同一磁芯窗口内容纳更多铜截面积——可能支持更多匝数，在相同 I_{sat} 下提高电感量，或在磁芯不同尺寸时以更低 I_{sat} 实现相同电感量。

Q4：PROMAGTECH定制扁平线电感的典型交货周期是多少？

库存标准产品：1–2周。定制样品（现有磁芯工装上的新绕线规格）：从确认订单起3–4周。需要新磁芯工装的定制样品：5–8周。样品批准后量产首批：4–6周。

Q5：PROMAGTECH能否提供圆线和扁平线设计的对比数据？

可以。对于正在为特定应用评估两种方案的设计团队，PROMAGTECH可以提供电感量、25°C和85°C下DCR、额定电流下温升以及尺寸对比数据。请提供变换器拓扑、电流、频率、电感量目标、DCR限值和封装空间。

九、相关技术资源

资源	说明	链接
SMD扁平线电感	用于紧凑功率模块的低矮表贴扁平线电感	promagtech.com/products/smd-flat-wire-inductor.html
高功率密度扁平线磁性白皮书	圆线vs扁平线在窗口填充、交流损耗、热路径方面的取舍分析	promagtech.com/technical-resources/high-power-density-flat-wire-magnetics-white-paper.html
扁平线电感选型指南	对比扁平线和圆线在DCR、热路径、饱和特性方面的差异	promagtech.com/technical-resources/flat-wire-vs-round-wire-inductors.html
AIDC与储能PCS电感设计指南V4	12章技术指南：800V储能、AI Server、PFC、磁芯材料、DCR	promagtech.com/tech/aidc-ess-inductor-design-guide

<p>深圳市谱磁科技有限公司</p> <p>SHENZHEN PROMAGTECH CO., LTD.</p> <p>www.promagtech.com</p> <p>zyong@promagtech.cn</p> <p>扁平线功率电感 · 变压器 · 定制磁性元件</p>	<p>提交设计评审</p> <ul style="list-style-type: none"> • 提供变换器拓扑、电流、频率、电感量和封装尺寸 • 完整规格24小时内给出初步技术响应 • 样品周期：标准品2周 / 定制品3-4周 • 量产项目：AIDC · 储能PCS · EV充电 · 工业电源
--	---