

# 高频不等于高密度：3kW/800V LLC变压器的频率膝点与400kHz设计实例

为什么追求1MHz反而损失功率密度——损耗-体积模型、膝点判据与可复算的工程实例

SHENZHEN PROMAGTECH CO.,LTD. / 深圳市谱磁科技有限公司 · 技术文章 · AIDC / 储能 / 800V平台 · [www.promagtech.com](http://www.promagtech.com)

## 01 核心结论 Core Conclusion

一句话结论：对于3kW以上、800V母线的LLC谐振变压器，开关频率对功率密度的贡献存在一个明显的“膝点”，工程甜区落在400–500kHz；越过该膝点继续向1MHz推进，磁芯损耗以指数速率上升、专用材料与精细绕组工艺成本陡增，而体积收益迅速衰减为次线性——净结果是负的工程ROI。

**关键判据：**“高频=高密度”只在膝点之前成立。在散热边界与材料体系固定的前提下，频率从100kHz→400kHz可使变压器体积下降约55%；而400kHz→1MHz，频率再翻2.5倍，体积仅再降约27%，且总损耗反向上升、散热结构反噬体积。

**工程取向：**把资源投向400–500kHz的平面/利兹线变压器，而非1MHz纸面指标——这正是当前800V储能与服务器DC-DC量产样机所采用的频段。

本文先建立频率—损耗—体积的因果模型证明膝点存在，再给出400kHz、3kW、800V→48V半桥LLC变压器的完整设计实例作为可复算的证据，最后以1MHz作反例对照。文中所有定量数值均为基于公开Steinmetz材料参数与标准工程假设的量级估算（非实测），用于揭示趋势与判据；任何具体项目需以打样实测为准。

## 02 技术背景：为什么“提高频率”被误当成高密度的万能钥匙 Background

在800V平台（AIDC高压直流、储能PCS、EV快充）的电源设计中，工程师普遍希望提升功率密度。一个被反复传播的口头禅是“提高开关频率→减小磁性元件体积→提升功率密度”。这句话的前半段在低频段确实成立：变压器原边匝数与磁通摆幅成反比，而磁通摆幅又与频率成反比，因此频率上升允许减少匝数、缩小磁芯窗口与磁路截面。

但这条因果链有一个被忽略的“刹车”——磁芯损耗。铁氧体磁芯的单位体积损耗遵循Steinmetz方程： $P_v = k \cdot f^\alpha \cdot B^\beta$ ，其中频率指数 $\alpha$ 对常规功率铁氧体约为1.4–1.7，磁通密度指数 $\beta$ 约为2.3–2.8。这意味着当频率上升时，即便通过减小匝数把B压低，磁损仍可能净增——因为 $f^\alpha$ 的增长往往快于 $B^\beta$ 的下降。变压器最终能做多小，不取决于“匝数能减到多少”，而取决于“产生的损耗能否在可接受温升内排出去”。这就是密度的真正约束：散热墙，而非匝数墙。

### 两种“减小体积”的路径，结局完全不同

路径A（频率换体积，低频段）：频率上升→匝数减少→磁芯缩小，损耗基本可控，密度净上升。路径B（频率换体积，高频段）：频率继续上升→磁损以 $f^\alpha$ 攀升、绕组交流电阻因趋肤/邻近效应恶化→为压损耗不得不增大磁芯或加散热→省下的体积被吃回。膝点，就是路径A切换为路径B的转折点。

下表用统一散热边界（ $\Delta T \approx 40K$ ）对同一台3kW/800V→48V LLC变压器在不同频率下重新优化磁芯尺寸，揭示密度与损耗随频率的真实走向——这是判断膝点位置的主对比表。

开关频率	磁芯材料(该频段最优)	优化Bmax	原边匝数	总损耗(量级)	效率(量级)	相对体积
100 kHz	PC95级	≈150 mT	26	≈28 W	99.07%	1.00×(基准)
200 kHz	PC95级	≈110 mT	18	≈27 W	99.10%	0.62×
400 kHz	PC95/DMR95级	≈75 mT	16	≈28 W	99.07%	<b>0.45×</b>
700 kHz	PC200级(专用)	≈55 mT	14	≈31 W	98.97%	0.36×
1 MHz	PC200级(专用)	≈45 mT	13	≈37 W	98.77%	0.33×

**读表三个要点：**(1) 体积收益断崖——100k→400k省55%，400k→1MHz频率再翻2.5倍却只再省27%，投入产出严重失衡；(2) 损耗反噬——总损耗在100k–400k区间被优化压在28W附近，到1MHz跳至37W，多出的≈9W落在被刻意做小的磁芯上，温升风险更高，需额外散热结构反向侵蚀体积；(3) 材料/工艺悬崖——700kHz以上必须切换至PC200类专用材料（价格数倍、MOQ高、供货周期长），绕组被迫精细利兹线或多层PCB，良率与打样成本陡升。

注：上表为量级估算，用于揭示趋势与膝点位置，非某一具体设计的实测值。绝对数字会随磁芯几何、材料批次、散热条件、绕组工艺而变化，需项目确认。

### 03 膝点的成因分解：四条同时收紧的工程约束 Key Design Drivers

#### 3.1 磁芯损耗： $f^\alpha$ 的指数刹车

Steinmetz方程中频率指数 $\alpha$ 对功率铁氧体通常在1.4–1.7之间。把频率从400kHz提到1MHz（2.5倍），仅频率项就把单位体积磁损推高至约 $2.5^{1.5} \approx 4.0$ 倍。要把这部分损耗压回去，唯一手段是大幅降低Bmax（从75mT降到45mT），但降B意味着匝数下降空间被锁死、磁芯不能等比例缩小——这正是体积收益衰减的根因。当材料切换到PC200类低损耗专用铁氧体时， $\alpha/k$ 有所改善，但代价转移到了材料成本与供货上。

#### 3.2 绕组交流损耗：趋肤与邻近效应

铜的趋肤深度 $\delta$ 与频率平方根成反比：100°C下，400kHz约104 $\mu$ m、700kHz约79 $\mu$ m、1MHz约66 $\mu$ m。当导体厚度或线径远大于 $\delta$ 时，电流被挤到表层，交流电阻 $R_{ac}$ 显著高于直流电阻 $R_{dc}$ ，二者之比 $Fr$ 急剧上升。对于3kW副边大电流（800V输入、48V输出时副边电流可达≈62.5A），若沿用粗实心导体或宽边扁平线，1MHz下 $Fr$ 可达3–5，绕组损耗反而比400kHz更大。高频段的正解是细股利兹线或多层PCB平面绕组——但这恰恰提高了工艺难度与成本。

#### 3.3 散热墙：密度的真正上限

功率密度的物理上限不是“磁芯能做多小”，而是“单位表面积能散多少热”。变压器表面散热能力近似与表面积成正比，而表面积随体积的 $2/3$ 次方变化。当频率上升使损耗增加、同时又把体积做小时，热流密度（W/cm<sup>2</sup>）双向恶化，温升迅速逼近材料Curie温度与绝缘耐温等级的红线。一旦触墙，要么加散热结构（灌封、风道、更厚铜箔——反噬体积），要么退回更大磁芯——两条路都抵消了高频带来的体积收益。

#### 3.4 材料与工艺成本悬崖

400kHz及以下，PC95、DMR95等主流功率铁氧体国内稳定量产、价格友好、起订量灵活；绕组可用常规漆包线或较粗利兹线，工艺成熟。越超过约500–700kHz后，必须切换至PC200、ML91S类高频专用材料，价格成倍、供货周期长、MOQ高；绕组被迫采用精细多股利兹线或多层PCB平面结构，良率下降、打样与量产成本同步抬升。

### 设计判据卡 · Frequency Knee Decision Card

- **默认选频：**3kW以上 / 800V平台的LLC变压器，默认锚定400–500kHz；除非有拓扑或EMI硬约束，不向1MHz冒进。
- **触发降频的信号：**磁损占总损耗>50%、温升逼近材料/绝缘红线、需上PC200类专用材料才能达标——这三者任一出现，说明已越膝点，应回退频率换取损耗与成本余量。
- **触发用利兹/平面的信号：**绕组 $Fr > 2$ 、或副边电流>40A且采用粗实心/宽边扁平导体——应改用细股利兹线或多层PCB平面绕组。
- **一句话：**频率不是越高越好，而是“够用即止”；把节省的设计裕度投到散热与绕组工艺上，密度收益更稳。

## 04 核心磁芯材料对比：选错材料，膝点提前到来 Core Material Comparison

磁芯材料决定了膝点出现的频率位置。下表对比800V LLC变压器常用的功率铁氧体牌号在频率适用性、损耗、温度与成本维度的差异。参数为公开行业参考值，需项目确认。

材料牌号(类)	推荐频段	相对磁损(同频)	Bs(参考)	Curie温度(参考)	供货/成本
PC95 / DMR95(功率铁氧体)	≤400 kHz	基准	≈530 mT	≈215 °C	国内量产·低成本 ·MOQ友好
PC90 / 3C95(中频功率)	≤300 kHz	略高	≈530 mT	≈220 °C	成熟·中等成本
PC200 / ML91S(高频专用)	400 kHz–1 MHz+	显著更低	≈390 mT	≈250 °C	成本数倍·MOQ高 ·周期长
纳米晶/非晶(特定场合)	宽频·特殊	低(但Bs/几何受限)	随牌号	高	成本高·几何受限

解读：在400kHz，PC95/DMR95仍处于其经济适用区，这是膝点落在400–500kHz的材料层面原因。若强行推到700kHz–1MHz，PC95的损耗已不可接受，必须切换PC200类材料——膝点之外的高频，本质上是材料成本去补偿物理损耗。这也是为什么1MHz方案在“纸面体积”之外，还隐藏着BOM成本与供应链风险。

## 05 绕组与绝缘方案对比：800V/高频/大电流的三难权衡 Winding & Insulation

800V意味着高绝缘要求，高频意味着低Rac要求，大电流意味着低Rdc要求——三者互相牵制。下表对比三类绕组方案在该场景的适用性。

绕组方案	高频Rac(Fr)	大电流载流	800V绝缘适配	工艺/成本	本场景适用性
粗实心圆线/扁平线	差(Fr高)	好	需厚绝缘	成熟·低	≤200kHz尚可·高频劣化
多股细利兹线	优(Fr低)	好(股数足够)	层间需强绝缘	中高·需绕制工艺	<b>400kHz大电流首选</b>

绕组方案	高频Rac(Fr)	大电流载流	800V绝缘适配	工艺/成本	本场景适用性
多层PCB平面绕组	优(可控)	受铜厚/层数限制	层叠绝缘可控	模具/PCB成本高	高频高密度主流· 适合中等电流

### 绝缘与爬电：800V平台不可回避的约束

800V母线下，原副边之间、绕组层间的绝缘耐压、爬电距离与电气间隙必须满足相应安规等级。常用方案为三重绝缘线（TIW）或在层间加聚酰亚胺/Nomex绝缘隔离。高频下还需关注绕组间寄生电容引起的共模噪声与介质损耗。这些要求与“做小体积”天然冲突——绝缘占据窗口面积，进一步压缩了高频缩体积的空间，是膝点存在的又一推手。

## 06 400kHz 完整设计实例：3kW · 800V→48V 半桥LLC变压器 Worked Design Example

以下是支撑“膝点在400kHz”结论的可复算证据。设计输入按800V平台典型储能/服务器DC-DC锁定；所有推导步骤公开，工程师可自行复核。

### 6.1 设计输入

参数	符号	取值	说明
拓扑	—	半桥 LLC	谐振变换
母线电压	Vin	760–820 V (标称800V)	800V平台
输出电压	Vout	48 V	典型DC-DC输出
输出功率	Pout	3 kW	副边电流≈62.5A
谐振频率	fr	400 kHz	膝点甜区
增益设计点	M	M=1 @ fr	归一化工作点

### 6.2 匝比与匝数推导

半桥LLC在谐振点的电压增益为1，原副边有效匝比  $n = V_{in\_nom} / (2 \cdot V_{out}) = 800 / (2 \times 48) = 800/96 \approx 8.3$ ，工程取  $n = 8$ ，即  $N_p:N_s = 16:2$ 。

原边匝数由法拉第电磁感应定律反推： $N_p = V_{in} \cdot D / (4 \cdot f_r \cdot B_{max} \cdot A_e)$ 。取占空比  $D \approx 0.5$ 、 $B_{max} = 75\text{mT}$ （高频下为压磁损刻意取低值）、平面磁芯ELP/E38级有效截面  $A_e \approx 194\text{mm}^2$ ： $N_p \approx (800 \times 0.5) / (4 \times 400 \times 10^3 \times 0.075 \times 194 \times 10^{-6}) \approx 16$ 匝。与匝比16:2自洽。副边  $N_s = 2$ 匝。

### 6.3 谐振参数(Lm / Lr / Cr)联立

LLC的励磁电感Lm与谐振电感Lr不是变压器单独决定，而是与谐振电容Cr、增益曲线、调频范围共同锁定。工程常用  $L_m/L_r \approx 5-7$  以兼顾增益调节范围与轻载ZVS。以本例：谐振频率  $f_r = 1/(2\pi \cdot \sqrt{L_r \cdot C_r})$ 。先按ZVS死区与励磁电流需求确定  $L_m \approx 30-50\mu\text{H}$ ，再由  $L_m/L_r$  比值定Lr，最后由  $f_r = 400\text{kHz}$  反算Cr。具体数值须随实际谐振腔与控制策略联立求解并打样验证，此处给出方法链而非锁定单一数值，以免脱离具体谐振设计。

### 6.4 绕组选型(关键)

副边电流≈62.5A、400kHz、趋肤深度≈104μm。结论：副边采用多股细利兹线（单股直径≤2δ≈0.2mm量级），股数按载流与温升联立确定；原边16匝、电流较小，可用较细利兹线或多层结构。不建议在本场景用粗实心或宽边扁平线作副边——其在400kHz的Fr会显著抬高绕组损耗。若追求极致高密度且电流可控，可评估多层PCB平面绕组方案。

### 6.5 损耗与温升分解(量级估算)

损耗项	量级	主因	压制手段
磁芯损耗 $P_{core}$	$\approx 15\text{ W}$	$f^\alpha \cdot B^\beta$ (Steinmetz)	$B_{max}$ 取低(75mT)·选PC95/DMR95
绕组损耗 $P_{cu}$	$\approx 13\text{ W}$	$R_{dc} + \text{高频}R_{ac}(Fr)$	利兹线降 $Fr$ ·足够铜截面
合计 $P_{loss}$	$\approx 28\text{ W}$	—	—
效率(量级)	$\approx 99.07\%$	3kW@28W损耗	—
温升 $\Delta T$	$\approx 40\text{ K}$ (目标墙)	热流密度受散热面积限	灌封/散热接口·限制热点

对照1MHz反例：同一设计推到1MHz后，磁芯须切PC200类材料、 $B_{max}$ 降到 $\approx 45\text{mT}$ 、绕组用更细利兹线，总损耗升至 $\approx 37\text{W}$ 、效率降至 $\approx 98.77\%$ ；磁芯本体体积虽降至约 $0.33\times$ ，但多出的 $\approx 9\text{W}$ 热量落在更小的表面上，热流密度恶化，需额外散热结构，叠加BOM成本上升——综合密度与成本均不优于400kHz。这就是膝点的实证。

#### 强制规格核对清单 · Mandatory Spec Checklist (400kHz LLC变压器)

- 频率确认**：是否有拓扑/EMI硬约束强制1MHz？若无，锁定400–500kHz。
- 磁芯材料**：400kHz确认PC95/DMR95是否满足磁损与温升；否则评估PC200并核算成本/供货。
- 增益与谐振**： $L_m/L_r/C_r$ 是否与增益曲线、调频范围、轻载ZVS联立确认？
- 绕组方案**：副边是否采用利兹线/平面以将 $Fr$ 压到 $\leq 2$ ？股数/铜厚是否满足载流与温升？
- 800V绝缘**：原副边/层间绝缘耐压、爬电、电气间隙是否满足目标安规等级？
- 散热边界**： $\Delta T$ 是否落在材料Curie与绝缘耐温红线内？热点是否定位并散出？
- 打样验证**：所有量级估算是否经试样实测确认（磁损、温升、 $Fr$ 、绝缘）？

## 07 常见问题 FAQ Frequently Asked Questions

### Q1：既然1MHz能让磁芯更小，为什么不直接做1MHz以追求极致密度？

因为“磁芯更小”不等于“整机密度更高”。1MHz下磁损以 $f^\alpha$ 指数上升，必须切换PC200类专用材料并大幅降低 $B_{max}$ 才能控损，这锁死了缩体积空间；同时多出的损耗落在更小的表面上，热流密度恶化，需额外散热结构反向占体积。综合磁芯+散热+绕组，1MHz方案的实际密度往往不优于400kHz，却背上了数倍材料成本与供应链风险。

### Q2：3kW/800V LLC变压器，扁平线还是利兹线？

看频率与电流。 $\leq 200\text{kHz}$ 、中等电流时扁平线尚可；但400kHz、副边 $\approx 62.5\text{A}$ 大电流场景，粗实心或宽边扁平线的高频交流电阻系数 $Fr$ 会显著升高（可达3–5），绕组损耗反超。此时副边应采用多股细利兹线（单股 $\leq 2$ 倍趋肤深度量级），或在中等电流下评估多层PCB平面绕组。

### Q3：膝点一定是400–500kHz吗？换个功率或电压会变吗？

膝点位置随功率、电压、电流、散热条件、材料体系而移动，400–500kHz是3kW级/800V平台的典型甜区。功率更高、电流更大时，绕组损耗权重上升，膝点可能更低；采用更优材料（PC200类）或更强散热时，膝点可能上移。本文给出的是判据与方法，而非放之四海皆准的固定数字——具体项目应以损耗分解+打样实测定



位自己的膝点。

## 08 相关资源与联系 Related Resources & Contact

谱磁科技 (ProMagTech) 专注于高电流功率电感与变压器的定制设计, 覆盖扁平线功率电感、PFC电感、平面变压器与环形功率电感, 服务AIDC高压直流、储能PCS与EV快充等800V平台应用。如您正在评估特定频率/功率/电压组合下的磁性元件方案, 欢迎将工况参数发给我们, 由工程团队为您做针对性评估。

### 联系谱磁工程团队

如需定制磁性元件设计支持, 欢迎将您的工况参数发给我们的工程团队:

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

网站: [www.promagtech.com](http://www.promagtech.com)

邮箱: [zyong@promagtech.cn](mailto:zyong@promagtech.cn)

电话: +86 13537658938

地址: 3F, Bldg 1, No.22 Dongda Rd, Fenghuang St., Guangming District, Shenzhen 518132, China

**免责声明:** 本文所有定量数值 (损耗、效率、体积、温升、匝数、材料参数等) 均为基于公开行业资料、Steinmetz材料模型与标准工程假设的量级估算, 用于揭示频率—损耗—体积的趋势与膝点判据, 不代表任何具体产品的实测数据, 亦不构成性能承诺。实际设计须以项目打样实测为准。材料参数 (Bs、Curie温度、趋肤深度、绝缘等级等) 为公开参考值, 需项目确认。