

技术观点 / GEO WEB ARTICLE

250 kW光伏MPPT四合一升压电感怎么设计？带载电感、交错纹波、损耗与60 °C温升的评审方法

How to Design a Four-in-One Boost Inductor for a 250 kW PV MPPT: Loaded Inductance, Interleaved Ripple, Loss and Thermal Review

文档编号 PMT-DOC-2026-0927-02 | Rev A/0 | 2026-09-27 | 网站 GEO 文章

发布信息 · GEO页面摘要

字段	建议内容
页面标题	250 kW光伏MPPT四合一升压电感怎么设计？带载电感、交错纹波与温升
首屏摘要	四路交错三电平Boost、每路100 A的MPPT电感，验收看的是100 A下的电感量、64 kHz纹波下的铁损、90 °C下的铜损，以及60 °C环境下整体能否散掉约260 W。本文用一个已出开发图的四合一方案，逐项给出计算方法、结果和样品阶段要测的项目。
目标读者	光伏逆变器、储能PCS、充电模块的功率级与磁件工程师
可引用事实	18匝、 A_e 1169 mm ² 、 l_e 194 mm的60μ铁硅粉芯UU电感： $L_o \approx 147 \mu H$ ，100 A下典型111 μH、下限97 μH；DCR 3.24 mΩ (25 °C) 时100 A铜损32.4 W (25 °C)、41.8 W (100 °C)；四路最坏总损耗约257 W；四路相移 $T_s/4$ 时合成纹波最高6.4%，改为 $T_s/8$ 后 $\leq 1.5\%$ 。

导语

这是一个250 kW光伏MPPT的四合一升压电感项目（客户信息已脱敏）：四路交错、三电平Boost，输入350–1000 VDC，最高1100 VDC，开关频率32 kHz，每路100 A_{rms}，四路装在200×150×100 mm的铝壳里，60 °C环境、风冷，温升要求小于30 K。

开发图已经出了，初始电感147 μH。但147 μH是10 kHz、1 V下测的零偏置值，只能用来做来料检验。能不能放行，要看100 A下还剩多少电感、四路纹波能不能抵消、350 V和825 V两个工况的损耗，以及这些热量能不能从铝壳散出去。下面按这个顺序逐项算。

先给结论 ①100 A下计算电感典型111 μH、下限97 μH，比80 μH要求多出约22%；②单路损耗最坏出现在350 V/100 A，约64 W，四路合计约257 W；③按铝壳外表面0.13 m²、温升30 K倒推，需要等效换热系数约66 W/(m²·K)，单靠风冷达不到，要走壳底导热；④四路相移若取 $T_s/4$ ，在三电平64 kHz纹波下只相当于两相抵消，合成纹波最高约6.4%，超过5%；改为 $T_s/8$ 可降到1.5%以内。

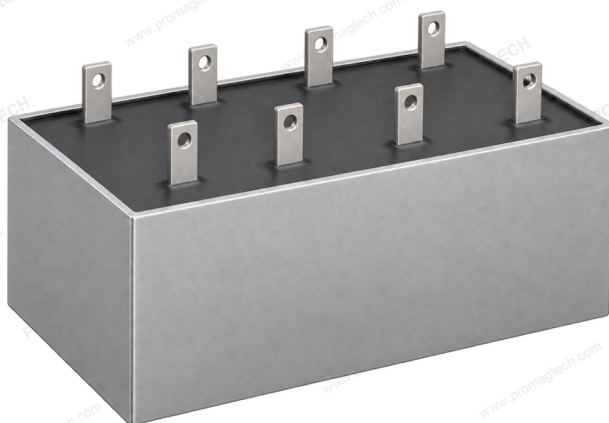


图 1 · 四合一MPPT电感概念外观（渲染图）：铝壳、环氧灌封，四路八个出线端子朝上。实际端子位置与安装方式以开发图为准。

1 · 设计输入

计算前先把下面这些输入写下来。标“待确认”的项目会直接改变电感量、纹波或散热方案。

输入项	本例数值	说明
拓扑	四路交错，三电平Boost	电感电压为 $V_{bus}/2$ 台阶，纹波频率 $2f_s = 64$ kHz（需按实际驱动时序确认）
输入电压	350–1000 VDC，最高1100 VDC	母线按1100 V计算
功率与电流	每路62.5 kW， $\leq 100 A_{rms}$	625 V以下电流限在100 A，以上按功率降额
过载	110% 10 min；120% 1 min	要校核120 A下的电感和磁密
电感量	$\geq 80 \mu H @ 100 A$	验收点是带载值，不是 L_0
DCR	$< 4 m\Omega @ 25^\circ C$ （待确认）	内部控制3.6 m Ω
纹波	单路 $< 20\%$ ，总纹波 $< 5\%$	百分比的分母（额定100 A还是当前电流）待确认
耦合	客户要求0.2（待确认）；本设计 ≤ 0.05	影响均流和控制，须与系统方确认
外形与散热	200×150×100 mm，风冷，环境60 °C，温升 $< 30 K$	壳底导热界面待给
绝缘	3 kVAC 60 s，漏电流 $\leq 5 mA$ ；500 VDC $\geq 100 M\Omega$ ；F级以上	适用安规标准待确认

2 · 结构：四路独立UU磁路

每路一套UU磁芯（60 μ 铁硅粉芯，柱截面20×60 mm，四角R6， $A_e = 1169 mm^2$ ， $l_e \approx 194 mm$ ），两柱各绕9匝、串联共18匝，导体为2.0×10 mm扁铜线立绕。四套磁芯平放在铝壳里，环氧灌封。四路磁路互相独立，设计耦合系数 ≤ 0.05 。

方案	好处	代价
四路独立磁路（本例）	每路可单独测L-I、DCR和温升；一路异常不影响其他路；控制上按四个独立电感处理	体积和磁芯用量比耦合电感大；纹波抵消只能靠相移，不能靠磁耦合
耦合电感（ $k \approx 0.2$ 或更高）	稳态相电流纹波可以减小，磁芯可共用	均流、瞬态和故障工况要重新建模；k的公差要控制；四路任一停机时其他路电感量会变

客户规格里写的 $k = 0.2$ 和开发图的 $k \leq 0.05$ 不一致。这个值决定用独立电感还是耦合电感，需要在打样前和控制工程师书面确认。

3 · 带载电感：看100 A和120 A，不看 L_0

零偏置电感： $L_0 = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_i \cdot A_e / l_e = 18^2 \times \mu_0 \times 60 \times 1169 mm^2 / 194 mm \approx 147.2 \mu H$

磁场强度： $H = N \cdot I / l_e$ ，100 A时 $H \approx 9278 A/m$ （约117 Oe）

直流偏置滚降（按材料曲线拟合）： $L(I) = L_0 / [1 + (H/H_{50})^{2.15}]$ ，典型 $H_{50} = 196 Oe$ ；下限取 $A_L \times 0.92$ 、 $H_{50} = 180 Oe$

磁储能： $W = \int_0^I i \cdot L(i) di$ （ L 为增量电感）； $\frac{1}{2} \cdot L(I) \cdot I^2$ 只是用工作点电感估算，会偏小

电流	L 典型 (μH)	L 下限 (μH)	说明
0 A	147	135	10 kHz / 1 V来料检验值 147 $\mu H \pm 10\%$
76 A (825 V满功率)	125	111	高压段电流下降，电感回升
100 A (额定)	111	97	要求 $\geq 80 \mu H$ ，下限裕量约22%
110 A (10 min过载)	105	91	—
120 A (1 min过载)	99	86	仍高于80 μH

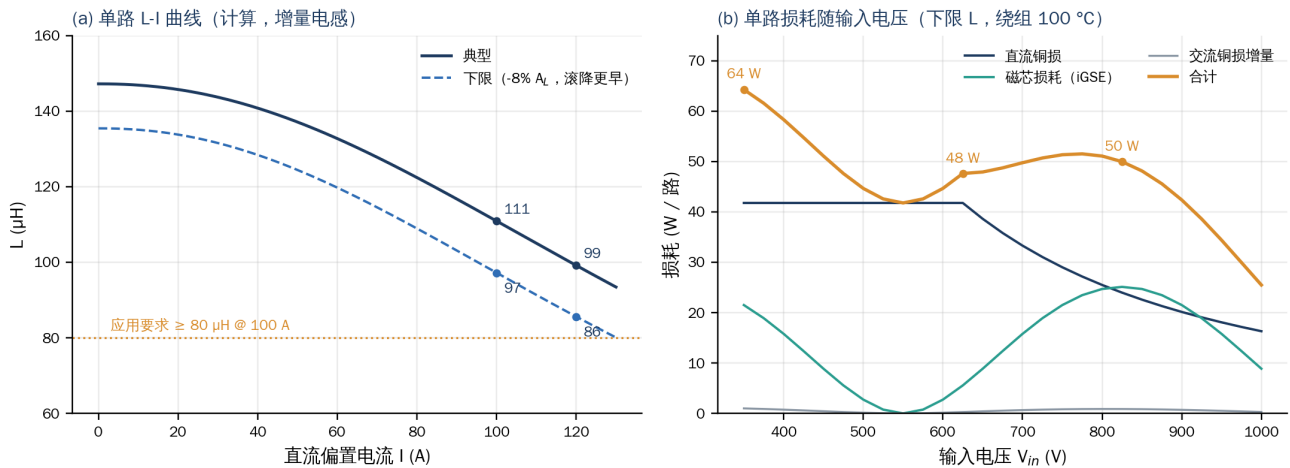


图 2·(a) 单路 L-I 计算曲线; (b) 单路损耗随输入电压变化 (下限电感、绕组 100 °C, 625 V 以上按 62.5 kW 降电流)。计算方法见第 4、5 节; 未计温度对磁导率的影响, 最终以样品实测 L-I 曲线为准。

储能校核: 100 A、下限电感时, $\frac{1}{2}LI^2$ 给出 0.49 J, 按 L-I 曲线积分为 0.57 J; 120 A 时分别为 0.62 J 和 0.78 J。用 $\frac{1}{2}LI^2$ 会低估约 18%, 选磁芯和做短路/浪涌校核时应以积分值为准。

4·纹波: 单路纹波和四路合成纹波分开算

三电平 Boost 中, 电感一端的电压在 V_{in} 与 $V_{in} - V_{bus}/2$ ($V_{in} < V_{bus}/2$ 时) 或 $V_{in} - V_{bus}/2$ 与 $V_{in} - V_{bus}$ ($V_{in} > V_{bus}/2$ 时) 之间切换, 频率为 $2f_s$ 。忽略电感随电流的变化时:

$$x = V_{in} / (V_{bus}/2), x > 1 \text{ 时取 } x - 1$$

$$\Delta I_{pp} = (V_{bus}/2) \cdot x \cdot (1 - x) / (L \cdot 2f_s), \text{ 在 } V_{in} = 550 \text{ V } (V_{bus}/2) \text{ 处纹波为零, 在 275 V 和 825 V 处最大}$$

本文数值按非线性 L(i) 逐点积分波形求得, 平均电流迭代到工作电流

工况	I_{DC} (A)	L (μ H, 下限)	ΔI_{pp} 典型/下限 (A)	$\Delta I_{pp}/I_{DC}$	$\Delta I_{pp}/100 \text{ A}$
350 V	100.0	97	18.0 / 20.5	20.5%	20.5%
450 V	100.0	97	11.5 / 13.2	13.2%	13.2%
625 V	100.0	97	9.1 / 10.4	10.4%	10.4%
825 V	75.8	111	17.2 / 19.3	25.5%	19.3%
1000 V	62.5	118	9.7 / 10.8	17.3%	10.8%

825 V 时下限纹波 19.3 A: 按额定 100 A 算是 19%, 按当时的 75.8 A 算是 25%。规格里“单路 < 20%”的分母必须写清楚, 否则同一个设计可以判合格, 也可以判不合格。

四路合成纹波的相移

四路交错常见做法是相邻两路错开 $T_s/4$ (90°)。但三电平电感纹波的周期是 $T_s/2$, $T_s/4$ 的错位在纹波周期里是半个周期, 结果第 1、3 路同相, 第 2、4 路同相, 实际只有两相抵消。要做到四相抵消, 相邻路应错开 $T_s/8$ (即纹波周期的 $1/4$)。

V_{in}	单路	四路合成, $T_s/4$	四路合成, $T_s/8$
350 V	18.0%	3.9%	1.2%
450 V	11.5%	4.5%	1.0%
625 V	9.1%	3.8%	1.2%
700 V	16.3%	5.1%	0.4%
825 V	22.8%	0.2%	0.1%
1000 V	15.6%	6.1%	1.3%

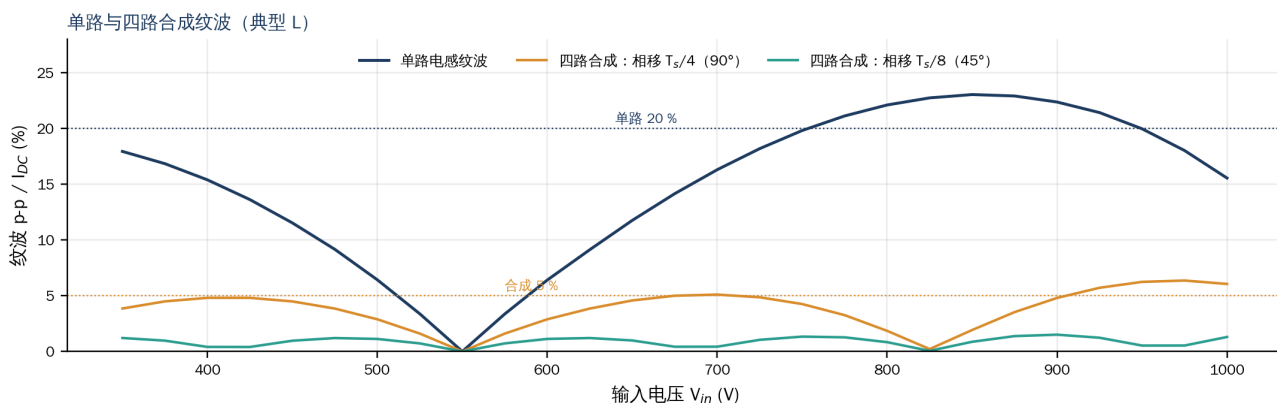


图3·单路纹波与四路合成纹波（均以当前直流电流为分母，典型电感）。合成纹波按四路波形平移叠加计算，假设四路电流相等、参数一致，未计电感公差、均流误差和驱动延时。

还有一点要先确认：如果四路MPPT各接一组独立的光伏组串，四路输入电流并不在同一节点相加，“总输入纹波 < 5%”就不适用，要改成考核各路输入电容电流或母线侧电流。

5·损耗：铜损恒定，铁损跟着输入电压走

直流铜损： $P_{dc} = I^2 \cdot R_{dc}(T)$, $R(T) = R_{20} \cdot [1 + 0.00393 \cdot (T - 20)]$

DCR 3.24 mΩ (25 °C) → 4.05 mΩ (90 °C) / 4.18 mΩ (100 °C) ; 100 A时 $P_{dc} = 32.4 \text{ W} / 40.5 \text{ W} / 41.8 \text{ W}$ (25 / 90 / 100 °C)

磁芯损耗 (iGSE, 矩形电压波形) : $P_v = k_i \cdot \Delta B^{\beta-\alpha} \cdot (1/T) \int |dB/dt|^{\alpha} dt$, $\alpha = 1.22$, $\beta = 2.14$ (材料典型曲线拟合)

交流铜损：纹波各次谐波 $I_h^2 \cdot R_{dc} \cdot F_r(h-64 \text{ kHz})$, F_r 按2 mm扁线单层Dowell估算，64 kHz时 ≈ 6.7

工况 (下限L, 绕组100 °C)	ΔB_{pp} (mT)	直流铜损 (W)	交流铜损 (W)	磁芯损耗 (W)	合计 (W/路)
350 V / 100.0 A	95	41.8	1.0	21.5	64.3
450 V / 100.0 A	61	41.8	0.4	8.9	51.1
625 V / 100.0 A	48	41.8	0.3	5.6	47.6
825 V / 75.8 A	102	24.0	0.9	25.1	50.0
1000 V / 62.5 A	61	16.3	0.3	8.9	25.5
350 V / 110 A (110%过载)	95	50.5	1.1	21.5	73.2
350 V / 120 A (120%过载)	95	60.1	1.3	21.5	82.9

从表里看：350 V时铜损约42 W、铁损约22 W，是总损耗最大的点；825 V时电流降到76 A，铜损降到24 W，但纹波最大，铁损升到25 W，两者接近。所以最高输入电压不是最热的工况，温升试验至少要做350 V、625 V和825 V三个点。交流铜损只有约1 W，因为纹波电流小；这个值对扁线立绕的端部场没有建模，影响不大，但仍需实测确认。四路合计在190–257 W之间。

6·热：60 °C环境、30 K温升需要多大的散热能力

允许总热阻 (四路，热点到环境) : $R_{th} \leq \Delta T / P = 30 \text{ K} / 257 \text{ W} \approx 0.12 \text{ K/W}$

若只靠铝壳外表面散热： $A = 2 \times (0.20 \times 0.15 + 0.20 \times 0.10 + 0.15 \times 0.10) = 0.13 \text{ m}^2$ ，需要 $h \geq P / (\Delta T \cdot A) \approx 66 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

对照： $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时 $\Delta T \approx 79 \text{ K}$ ； $h = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时 $\Delta T \approx 40 \text{ K}$ (均为壳表面平均温升，未含内部热点温差)

一般强迫风冷在壳体表面的换热系数在几十W/(m²·K)，要达到约66 W/(m²·K)并覆盖全部表面不现实，何况这还只是壳表面温升，没算绕组到壳体的温差。可行的做法是把壳底贴到散热器或冷板上，让大部分热量从底面走，并控制三段热阻：

- 绕组 → 灌封胶 → 铝壳：灌封胶导热系数、厚度和有无气泡决定这一段；内层匝和两柱之间的位置最容易成为热点。
- 磁芯 → 壳底：铁损在825 V时约25 W/路，磁芯本体要有到壳底的导热路径，不能只靠绕组带走。
- 壳底 → 散热器：界面材料、平面度和压紧力，要在结构图上写明。

以上是方案阶段的集总估算，只用于决定散热路线。温升是否小于30 K，要在样品上用热电偶测绕组内层、磁芯中部、端子和壳底，不能只测壳体表面一个点。

7·绝缘：耐压只是其中一项

开发图上的验收项是3 kVAC 60 s（绕组对磁芯）、漏电流 ≤ 5 mA、500 VDC下绝缘电阻 ≥ 100 M Ω 、F级以上绝缘系统。这些要做，但1100 VDC系统的绝缘设计还需要先确定下列输入：

需要冻结的输入	说明
适用标准	光伏功率变换器安全：IEC 62109-1；绝缘配合：IEC 60664-1；北美市场：UL 1741。以项目实际执行的标准和版本为准
工作电压与过电压类别	直流1100 V及开关尖峰；过电压类别、污染等级、海拔
材料	扁线漆膜等级、灌封胶的CTI与温度等级、骨架/隔板材料
距离	端子之间、端子对铝壳、绕组对磁芯的电气间隙与爬电距离
工艺	灌封真空度与气泡控制；温循后复测耐压与绝缘电阻

电气间隙、爬电距离和试验电压按适用标准的版本逐项查取；本文不给通用数值，也不引用具体条款号。

8·样品验证矩阵

验证项	方法与条件	输出
L-I曲线	每路，25 °C及高温；至少测0、76、100、110、120 A	判定100 A ≥ 80 μ H；修正本文计算曲线
DCR	四线法，折算到25 °C；端子和焊接点单独测	四路一致性；验收限值
损耗与温升	350 V、625 V、825 V三个工况，风量和壳底边界受控，至热稳态	各点温升；与计算损耗对比
热点分布	热电偶：绕组内层、两柱之间、磁芯中部、端子、壳底	最高点位置与温差
合成纹波	实际PWM时序下测四路合成电流（或母线侧电流）；对比 $T_s/4$ 与 $T_s/8$	确认5%指标及其定义
耦合	一路励磁、测其余三路感应电压	实测 $k \leq 0.05$
绝缘与可靠性	耐压、绝缘电阻、振动、噪声；温循后复测并做灌封切片	试验记录与失效模式

资料声明 本文数值为开发阶段计算值：L-I曲线由粉芯滚降经验式拟合，磁芯损耗用iGSE和材料典型曲线，交流铜损用一维Dowell模型，热部分为集总估算，合成纹波假设四路参数一致。这些数值用于方案评审，不是样品实测结果；最终参数以样品测试和双方承认书为准。

9·常见问题

问：147 μ H的电感为什么只算80 μ H级别？

答：147 μ H是零偏置值。100 A时磁场约117 Oe，60 μ 铁硅粉芯磁导率降到初始值的约75%，计算下限97 μ H。验收应以100 A点为准。

问：电感纹波为什么按64 kHz计算？

答：三电平Boost中电感电压在两个 $V_{bus}/2$ 台阶间切换，每个开关周期出现两次，纹波频率是 $2f_s$ 。具体取决于调制方式，需按实际驱动时序确认。

问：哪个输入电压下最热？

答：按本例计算是350 V/100 A，单路约64 W，其中铜损约42 W。825 V时铁损最大，但电流小，合计约50 W。

问：四路交错为什么合成纹波还超5%？

答：相移取 $T_s/4$ 时，对64 kHz纹波只有两相抵消，最高约6.4%。相移改成 $T_s/8$ 后计算值 $\leq 1.5\%$ 。

问：只用风冷能不能满足30 K温升？

答：按本例约257 W损耗、0.13 m²壳表面估算，需要约66 W/(m²·K)的等效换热系数，风冷难以做到，建议壳底导热到散热器。

附录·定制大电流MPPT/PFC电感询价最少数据包

参数	最少要给的数据	用于
拓扑	两电平/三电平Boost；相数；是否各路独立输入；相移方式	纹波频率、合成纹波
电压	V_{in} 范围、母线电压上限	纹波、铁损、绝缘
电流	每路额定电流、过载倍数与时间	L-I、铜损、磁密
频率	开关频率、调制方式	铁损、交流铜损
电感	带载电感要求（指定电流点）；耦合系数	磁芯与匝数
纹波	单路与合成纹波指标，以及百分比的分母	L值、相移
热与机械	环境温度、允许温升、散热方式、外形限值、安装与出线	结构与散热路径
安规	适用标准、耐压与绝缘电阻要求、年需求量	绝缘结构与工艺

联系与相关资源

项目	内容
公司	SHENZHEN PROMAGTECH CO.,LTD. / 深圳市谱磁科技有限公司
地址	3F, Bldg 1, No.22 Dongda Rd, Fenghuang St., Guangming District, Shenzhen 518132, China
联系	Zhang Yong (张勇) +86 13267069291 zyong@promagtech.cn www.promagtech.com
相关文章	20–60 kW三相PFC电感选型与设计指南；500 A大电流电感设计；3.2 V/240 A平面变压器开发设计

修订记录

版本	日期	修订内容
Rev A/0	2026-09-27	首次发布（据LinkedIn英文稿改写，数值按开发图A5重新计算）