



EMI 滤波磁性器件 · 技术文章

两级集成共模电感

用于新能源汽车车载充电机、AI 服务器电源、光伏与储能逆变器的宽频 EMI 抑制

适用场景：EV OBC · AI Server PSU · 光伏逆变器 · 储能变流器

发布方	深圳市谱磁科技有限公司 (PROMAGTECH)
文件类型	技术文章 — EMI 滤波磁性器件系列
适用读者	功率电子工程师 · EMC 工程师 · 硬件研发
网址	www.promagtech.com
邮件	zyong@promagtech.cn

摘要

现代高功率变换系统——EV车载充电机（OBC）、AI服务器电源、光伏逆变器、储能变流器——的开关频率和功率密度不断提升，由此产生的传导电磁干扰（EMI）越来越强，必须在影响控制板、通信总线、传感器或相邻电路之前加以抑制。

两级集成共模电感将低频和高温两个EMI抑制级整合在同一个磁性元件中，在PCB空间受限的场合提供宽频共模噪声衰减。本文从结构原理、绕线设计取舍、磁芯材料选择、生产工艺控制和应用规格要求五个维度，系统介绍该器件的工程设计逻辑。

核心结论：当PCB空间受限、单级共模电感无法覆盖全频段EMI要求时，两级集成共模电感可在一个封装内同时提供低频和高温噪声抑制，是性价比与空间效率兼顾的工程解决方案。

一、背景：高功率变换系统中的 EMI 问题

每一台开关电源都会产生传导噪声。当功率开关开通或关断时，产生的电压和电流边沿以差模（DM）和共模（CM）两种路径传播——差模噪声在两根电源线之间传播，共模噪声则通过分布电容在电源线与机壳地之间传播。共模噪声因其通过杂散电容耦合到机箱、屏蔽线缆的特性而尤为难以控制。

CISPR 25、CISPR 32、IEC 61000-6-4、FCC Part 15以及汽车行业标准CISPR 12、CISPR 36等法规，规定了产品进入市场前必须满足的传导发射限值。达到这些限值通常需要在电源入口处同时配置差模和共模滤波级。

1.1 为什么单级共模电感往往不够？

传统单级共模电感只能在有限频带内提供阻抗峰值，其有效衰减范围取决于磁芯材料、匝数、绕线几何形状和绕组间的耦合程度。当传导发射限值从150 kHz延伸至108 MHz（如多数汽车和工业标准所要求）时，单级电感若不做得很大，就无法在频带的低端和高端同时提供足够的衰减。

低频端需要高电感量，对应高磁导率磁芯和较多匝数；高频端需要低寄生电容，对应较少匝数和最小绕组间电容的几何结构。这两个要求相互矛盾。

1.2 两级集成的设计思路

与其在PCB上串联放置两个独立的共模电感，两级集成方案将两个滤波功能整合在同一磁芯或同一封装中，从而减少：

- 元器件数量和PCB占用面积
- 两级之间PCB走线引入的寄生电感
- 装配工时和机械复杂度
- 空间受限场合的整体高度

集成并不消除滤波物理规律——两个级别仍需各自正确设计。它将工程挑战从PCB布局转移到磁性元件本身的设计上。

二、器件结构与设计要素

2.1 磁芯材料：非晶与纳米晶

磁芯材料决定了磁导率曲线、铁损、饱和行为和工作温度范围。用于高性能场合的两级集成共模电感，最常选用非晶或纳米晶合金制成的闭合磁芯。

特性	非晶磁芯	纳米晶磁芯	备注
初始磁导率	约 10,000–80,000 μ	约 20,000–150,000 μ	磁导率越高，单位匝数共模阻抗越大
100 kHz 铁损	低	极低	100 kHz 以上优先选纳米晶
饱和磁通密度	约 1.2–1.56 T	约 1.2–1.25 T	工作点类似，需校核直流偏置
居里温度	约 350–400°C	约 570°C	高温恶劣环境纳米晶更具优势
高频共模阻抗	良好	优秀	纳米晶阻抗可维持至 MHz 频段
相对成本	较低	中等偏高	非晶适用于多数 OBC 成本要求

闭合磁芯（环形或矩形闭环）是首选结构，因为它将磁通限制在磁芯内部，降低了磁阻气隙，同时减少了元件本身向外辐射的EMI，这在汽车和数据中心的内部EMI预算极为严苛的应用中尤为重要。

2.2 不对称绕线规格——为什么使用两种线径

两级集成共模电感的两个绕组通常采用不同的导线截面积，这是针对不同频率段和电流应力的刻意设计，而非随意的成本取舍。

粗线绕组——低频滤波级

低频级绕组承载主功率电流，需要在传导发射频带的低频段（通常150 kHz至1 MHz）提供足够的共模阻抗。较粗的扁平铜线可以降低：

- 直流电阻（DCR），从而降低额定电流下的 I^2R 铜损和温升
- 导体截面中的电流密度，提升在热要求严苛环境下的长期可靠性
- 工频下的绕组阻抗，维持高电流OBC和逆变器设计的效率

在该级别中优先选用扁平铜线，原因是：在相同窗口面积内可实现更高的铜填充率，绕线几何形状在批量生产中可重复，且能与磁芯表面或散热底板形成更好的热接触。

细线绕组——高频滤波级

高频级目标频段约为1 MHz至30 MHz及以上。在这些频率下，两个现象变得至关重要：趋肤效应和绕组间寄生电容。

趋肤效应使电流集中在导体表面薄层内，铜中的趋肤深度 δ 为：

$$\delta \text{ (mm)} = 66.1 / \sqrt{f \text{ (Hz)}} \rightarrow 1 \text{ MHz时 } \delta \approx 0.066 \text{ mm}, 10 \text{ MHz时 } \delta \approx 0.021 \text{ mm}$$

截面积约为一到两倍趋肤深度的细导线，几乎所有铜截面积都参与导流；而粗导线的内部铜区域被浪费。高频级采用较细导线，可在不增加主电流路径DCR的前提下提升高频衰减效率。

绕组匝间及两绕组之间的寄生电容为高频噪声提供了旁路路径，该电容与导体面向对侧绕组的表面积成正比。采用更细的导线可减小该面积，降低寄生电容，扩展共模电感的有效滤波频率上限。

2.3 扁平铜线与铜填充率

扁平铜线（矩形截面导线）在两级集成共模电感设计中具有以下工程价值：

扁平铜线在共模电感设计中的优势

- 更高铜填充率：矩形截面导线排列更紧密，单位窗口面积内铜截面积更大
- 更低 DCR：铜截面积增加，在相同匝数下降低绕组电阻
- 可控几何形状：绕线节距和层位置可重复，批量生产中寄生电容一致性好
- 改善热接触：扁平导线与相邻材料的接触面积更大，有利于散热
- 降低绕组高度波动：更平整的截面有助于将元件尺寸控制在自动化贴装的公差范围内

2.4 磁路优化

共模电感的磁路设计需要在提高共模阻抗的同时，将差模电感降至最低。在共模工作状态下，两线电流同向流过绕组，磁通在磁芯内叠加，产生高电感；在差模工作状态下，两线电流方向相反，磁通相消，只剩漏感作为差模分量。

两级集成设计必须在两个绕组段都保持这种磁通抵消原则。若绕线对称性被破坏——例如匝数不等或耦合系数不同——将产生意外的差模电感，可能畸变电流波形，并在滤波器下游的电力变换级引起额外的电流纹波。

设计原则： 共模阻抗应在目标噪声频率处最大化；差模电感应维持在共模电感的1%至3%以内。偏离这一平衡将导致滤波效果下降或变换器效率降低。

三、典型应用场景

3.1 EV 车载充电机 (OBC)

车载充电机将交流电网功率转换为直流电为动力电池充电。功率级通常采用PFC前级加DC-DC后级结构，两个级别均产生必须在交流入口抑制的传导EMI。

参数	典型 OBC 要求
额定交流输入电压	85–265 V AC (通用范围)
额定输入电流	8–32 A (3.3–22 kW 范围)
开关频率	65–200 kHz (SiC 方案可达 300 kHz+)
共模衰减目标	CISPR 25 Class 5 限值下 30–50 dB
工作温度范围	-40°C 至 +105°C (发动机舱或行李箱安装)
绝缘要求	耐压 ≥ AC 3000 V (高压隔离等级)
封装限制	高度受限, 多数 OBC 组件间隙 ≤ 15–25 mm

对于OBC设计，两级集成共模电感必须同时承载大连续电流、耐受汽车温度循环，并通过远高于普通工业设备的耐压测试。在此背景下，扁平铜线的价值尤为突出——它允许设计在不超出封装空间的前提下满足DCR和温升要求。

3.2 AI 服务器电源

AI 训练和推理系统从机架级配电系统汲取极高的峰值和平均功率。服务器电源工作在48 V总线或400 V交流输入，需同时通过CISPR 32传导发射限值并维持高效率以降低数据中心冷却成本。

在现代服务器PSU日益普遍的高开关频率下（GaN器件方案300 kHz至1 MHz已很常见），共模电感的高频性能成为决定性约束。采用纳米晶磁芯的两级集成设计，可将有效共模阻抗维持从1 MHz以下到30 MHz以上的宽频范围，用单个元件覆盖CISPR 32的全频段要求。

AI Server 特别提示： 在500 kHz至1 MHz开关频率的GaN服务器电源中，共模电感高频绕组的寄生电容必须被积极抑制。细线绕组配合纳米晶闭合磁芯的两级集成结构，是满足CISPR 32 Class B限值的可行路径之一。

3.3 光伏与储能逆变器

并网逆变器向公用电网注入交流电流，须在电网接口满足传导发射标准。高频开关产生的共模电流通过光伏阵列、电池组或直流母线对保护地的杂散电容流动。

这些漏电流可能触发交流侧的剩余电流保护装置（RCD），并增加直流回路的触电风险。交流输出或直流母线接口处的共模电感必须在全频率范围内有效抑制这些电流。

应用场景	主要 EMI 问题	电感关键要求
组串式光伏逆变器	共模电流通过光伏板对地电容流动	高低频阻抗兼顾，50/60 Hz 对地电流抑制
三相储能逆变器	150 kHz–30 MHz 传导噪声	宽频衰减，大工作电流
EV 直流快充站	对电网的传导和辐射 EMI	CISPR 11 Class A/B，耐压 ≥ 3 kV
并网工业 UPS	CISPR 11 第1组 A类	低差模漏感，高共模衰减

四、性能评估参数

评估或规格化两级集成共模电感时，工程团队应索取或实测以下参数。仅列出100 kHz电感量和DCR的供应商数据手册，不足以支撑严谨的设计评审。

4.1 共模阻抗曲线

应使用矢量网络分析仪（VNA）或阻抗分析仪，在适用EMI标准的全频率范围内测量共模阻抗曲线。该曲线揭示阻抗峰值频率、峰值以上和以下的衰减斜率，以及产生低阻抗窗口的自谐振位置。

对于两级集成设计，阻抗曲线理想状态下应呈现两个明显的阻抗峰，或一个比单级设计更宽、更平坦的频率响应，覆盖更大的频率范围。

4.2 直流电阻（DCR）

DCR决定铜损和温升。务必索取或测量工作温度下的DCR，而非仅25°C时的值。铜的电阻率随温度升高而增加：

$$DCR(T) = DCR(25^{\circ}C) \times [1 + 0.00393 \times (T - 25)]$$

DCR = 5 mΩ @ 25°C 的元件，在85°C时约为6.4 mΩ，在105°C时约为7.0 mΩ。在30 A设计中，与25°C相比，105°C时额外产生约3.15 W的热量。

4.3 温升与热验证

索取额定电流下的实测温升数据，而非仅凭热仿真结果。测试应在额定环境温度下，以代表性的热环境（自然冷却、强制风冷或散热底板接触，视实际应用而定）安装元件，并运行至热平衡，通常需要30至60分钟。

4.4 绝缘和耐压测试

高压系统中的共模电感必须承受绕组间及绕组对磁芯之间的电应力。所需耐压测试电压取决于系统工作电压：

工作电压（直流或交流峰值）	建议耐压测试电压	持续时间
300 V 以下	AC 1500 V	1分钟，无击穿或闪络
300 V – 600 V	AC 2000–2500 V	1分钟，无击穿或闪络
600 V – 1000 V	AC 3000 V	1分钟，无击穿或闪络
1000 V 以上	AC 4000 V+	按应用标准执行

当工作电压高于约300 V峰值且要求长服务寿命时，应增加局部放电（PDIV）测试。局部放电起始电压应高于系统最大工作电压并留有足够裕量。

4.5 差模电感和漏感

测量差模电感以确认绕线对称性可接受。过高的差模电感会在差模路径上引入额外的不期望滤波效果，畸变变换器电流波形，并干扰针对特定差模阻抗环境设计的差模滤波元件。

4.6 可靠性与环境测试

汽车应用请索取AEC-Q200合规文件；工业应用相关标准包括IEC 60068环境测试（温度循环、湿热、振动）和IEC 62368安全标准；进入欧盟市场的产品应提供含材料声明的RoHS合规文件。

五、生产工艺控制要点

两级集成共模电感比单级设计更难在批量生产中保证一致性。PROMAGTECH工程团队将以下工艺纪律确定为实现规格参数批次一致性的关键：

关键生产工艺控制项

- 绕线张力与节距控制：扁平铜线须以受控张力绕制，防止绝缘层破裂，并保持各单元匝间间距一致
- 绝缘系统选择：两级之间的绝缘须承受全工作电压加耐压测试电压；薄膜类型、厚度和介电强度须在工艺规范中文件化
- 磁耦合控制：两绕组级之间的空间关系决定了耦合系数；夹具控制绕线保证该关系批次间可重复
- 焊接工艺控制：扁平线端子需要受控的焊接温度和接触时间，避免损伤绝缘或产生虚焊
- 磁芯操作：非晶和纳米晶磁芯易碎；搬运、夹具和封装工艺不得引入可能导致磁芯破裂或磁导率下降的机械应力
- 出货前阻抗验证：对一个或多个点频的共模阻抗进行100%测量，确认绕线配置正确后方可出货

工程纪律： 大电流能力、汽车级可靠性、RoHS合规等性能声明，必须有项目专属图纸、材料规格、认证测试记录和可追溯性文件支撑。PROMAGTECH根据客户应用需求准备器件评审资料，而非仅凭产品照片。

六、如何规格化两级集成共模电感

在提交设计评审或询价请求之前，应明确以下参数。"用于EV充电机的共模电感"等模糊描述无法在没有这些信息的情况下进行评估。

参数	需要提供的內容	重要性说明
变换器拓扑	PFC+DC-DC、CLLC、DAB、H桥等	决定开关波形和噪声特性
额定电压	交流输入或直流母线电压，含变化范围	确定绝缘等级和耐压要求

参数	需要提供的內容	重要性说明
额定电流	有效值和峰值，脉冲时需提供占空比	决定线径、DCR和温升
开关频率	基频及相关谐波频率	确定需要滤波的频率范围
目标EMI标准	CISPR 25 Class 5、CISPR 32 Class B等	确定各频率点的衰减目标
共模阻抗要求	关键频率点的目标阻抗值 (Ω)	允许选择磁芯和匝数
DCR限值	工作温度下最大DCR ($m\Omega$)	控制铜损和热预算
绝缘要求	工作电压+耐压等级+适用标准	决定绝缘薄膜类型和厚度
封装空间	长×宽×高 (mm)、PCB焊盘、引脚间距	限制磁芯尺寸和绕线窗口
散热条件	自然冷却/强制风冷/散热底板/浸油	确定热设计依据
认证需求	AEC-Q200、UL、TUV、IEC、RoHS	影响材料选择和测试范围
年需求量	打样/小批量/量产，预计数量	决定生产工艺路线

七、常见问题解答

Q1: 本文中的参数可以直接用于量产吗?

不可以。本文所有数值均为设计参考和示意性举例。量产值须通过应用专项设计评审、批准样品、工作电流下的直流偏置测量、工作温度下的DCR测量、耐压测试和额定电流下的热验证逐一确认。

Q2: 两级集成共模电感与两个独立共模电感串联有什么实质区别?

电气上，若设计到等效规格，两种方案可以实现相似的衰减效果。实际差异体现在PCB空间、元件数量和级间寄生电感上。集成设计节省PCB面积，并消除两个独立元件之间PCB走线引入的寄生电感。取舍是元件设计复杂度更高，定制件的交货期通常也 longer。

Q3: 纳米晶磁芯是否总是比非晶磁芯更优?

并非如此。纳米晶磁芯在100 kHz以上频率具有更高磁导率和更低铁损，非常适合需要1 MHz以上强共模衰减的设计。但纳米晶磁芯成本更高，材料更脆，需要更精细的操作和工装。对于主要EMI问题在500 kHz以下且成本敏感的设计，非晶磁芯可能是更好的选择。正确选择取决于应用的具体阻抗要求和频率范围。

Q4: 为什么元件高度在 EV OBC 设计中如此重要?

EV车载充电机通常安装在垂直空间受限的封闭外壳中。交流输入侧的共模电感往往是EMI滤波器部分中最高的元件。若共模电感超出可用高度空间，无论电气性能多好也无法使用。采用扁平铜线和矩形闭合磁芯，有助于PROMAGTECH将元件高度控制在封装限制内，同时满足电气规格。

Q5: EV OBC 设计适用哪些 EMI 标准?

汽车应用最常见的标准包括：CISPR 25（车内辐射和传导发射，高性能OEM设计通常要求Class 5）、CISPR 12（整车外部辐射发射）和CISPR 36（电动和混合动力车辆低频发射）。中国市场的GB/T 18655对应CISPR 25。工业充电机还可能需满足CISPR 11和IEC 61000-6-4。设计团队在设定衰减目标前，应确认适用于其具体产品和目标市场的标准及等级要求。

八、提交设计评审

PROMAGTECH工程团队随时接受针对具体应用的两级集成共模电感需求评审。提交评审时，请提供第六章所列参数。收到完整规格后，通常在24小时内给出初步技术反馈。

联系 PROMAGTECH 工程团队： 邮件：zyong@promagtech.cn | 官网：
www.promagtech.com/contact.html

九、相关技术资源

资源	说明	链接
高频非晶共模电感	用于SiC/GaN和紧凑功率模块的非晶磁芯EMI滤波磁性器件	promagtech.com/products/high-freq-amorphous.html
三相共模电感	用于逆变器和储能变流器EMI滤波的三相共模扼流圈	promagtech.com/products/three-phase-common-mode.html
共模电感EMI设计指南	传导EMI抑制中的磁芯材料、绕线和阻抗评审要点	promagtech.com/technical-resources/common-mode-inductor-emi-design-guide.html



深圳市谱磁科技有限公司

SHENZHEN PROMAGTECH CO., LTD.

www.promagtech.com

zyong@promagtech.cn

扁平线功率电感 · 变压器 · 定制磁性元件

产品能力

- 两级集成共模电感及单级共模电感
- 非晶和纳米晶闭合磁芯 EMI 滤波磁性器件
- 用于逆变器和变流器的三相共模电感
- 用于 EV、光伏和储能的扁平线 PFC 和 DC-DC 电感
- 提供针对具体应用需求的定制设计评审服务