

摘要

单层铝基板 (Single-Layer Aluminum PCB) 凭借出色的散热性能和系统成本优势, 广泛应用于 LED 照明 (如路灯、灯管)、汽车电子及大功率电源模块中。随着消费电子市场竞争的加剧, 越来越多的应用场景都开始尝试将单层铝基板应用于产品设计中, 但同时, 这类电源由于单面板的设计非常容易受到各种噪声的影响导致出现电源异常, 输出震荡等各种问题, 因此在开发阶段必须采取适当的措施来加以规避。

本文首先介绍单层铝基板在电源设计中的优势, 随后基于 LM5145 对单层铝基板在电路设计中可能带来的挑战及典型噪声来源进行分析, 最后提出针对性的优化措施, 以确保电路的可靠性和稳定性。

单层铝基板概述

金属基印刷电路板 (Metal Core PCB, MCPCB) 是将印刷电路板附着于导热性能更优的金属基材之上, 通过金属基层实现更高效的热量传导, 从而改善电路板的散热性能。其中, 铝基 PCB 是 MCPCB 中最为广泛应用的类型之一, 能够为电子元件提供高效的散热与冷却能力, 进而提升产品的整体性能与可靠性。相比于常规的 FR4 玻璃纤维 PCB, 铝基板的导热系数通常为 $1\sim3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 部分高性能产品可达 $8\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上, 远优于 FR4 材料的 $0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右。这使得功率器件产生的热量能够快速传导至基板, 有效降低器件结温, 提升系统热可靠性。同时铝基 PCB 能够提供更高的机械强度, 具有更高的刚性和抗冲击性, 因此在高功率密度设计中可兼具散热和结构支撑的双重作用。

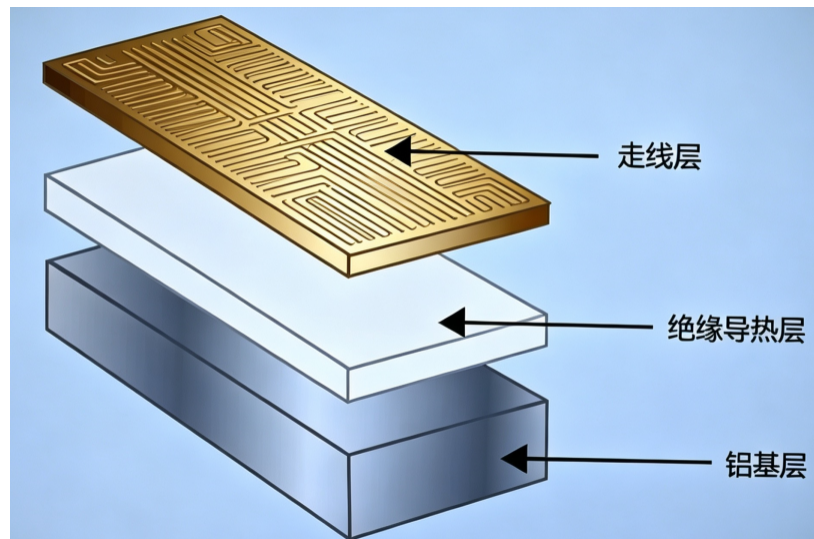


图 1. 单层铝基板结构示意图

成本方面, 单层铝基板的原材料及加工成本通常高于传统 FR4 板材。FR4 板材工艺成熟、供应链完善, 单位面积价格较低; 而铝基板因需要特殊的绝缘导热层材料及加工工艺, 其板材成本一般为同规格 FR4 板材的 $2\sim3$ 倍。尽管铝基板的板材成本较高, 但从系统整体角度来看, 其综合成本优势较为明显, 铝基板可以减小甚至省去额外的散热片使用, 散热结构的简化有助于减少装配工序, 降低生产制造成本; 因此, 在一些合适的应用场景中, 系统成本往往更具有竞争力, 尤其对于散热要求高, 空间受限的应用场景。

单层铝基板电源设计挑战

单层铝基板在系统成本和散热方面优势明显，但是其单层结构缺乏专用的内置电源层和接地层，且金属基底容易形成电容耦合，极易产生显著的电源噪声，这会给电源设计带来挑战。噪声产生的原因主要有以下几个方面首先是高频开关与瞬态电流，当驱动电路或开关管产生快速变化的电流时，电源路径中的寄生电感和电阻会引发电压急剧波动，形成纹波与地弹噪声；其次是缺少连续地平面对（GND），单层板的布线需在顶层进行，回流路径被拉长或断开。较大的电流环路会产生电磁辐射，并污染敏感的信号地。最后是铝基板层间电容效应，铜皮与铝基板之间仅有一层薄薄的导热绝缘层，这会形成较大的分布电容。高频噪声会通过该电容耦合到铝基板上，造成严重的共模辐射。辐射到应用端，电源就会出现输出不稳定甚至输出震荡等异常现象，以下会通过分析噪声来源给出常用的调试思路和解决方案，从而在开发阶段避免这些问题。

噪声来源分析及调试优化思路

接下来会以 LM5145 基于单面铝基板的设计为例，分析可能遇到的噪声问题以及常见的解决思路。LM5145 是一款耐压 75 V 的同步降压控制器，适用于高压输入电源或存在高压瞬变的输入电轨，可有效减少对外部浪涌抑制元件的需求。其高侧开关最小导通时间仅为 40 ns，支持大降压比转换，能够直接将 48 V 标称输入电压降至低压电轨，从而降低系统复杂度和整体方案成本。此外，LM5145 在输入电压跌落至 6 V 的情况下仍可持续工作，必要时占空比可接近 100%，使其成为高性能工业控制、机器人、数据通信及射频电源应用的理想选择。

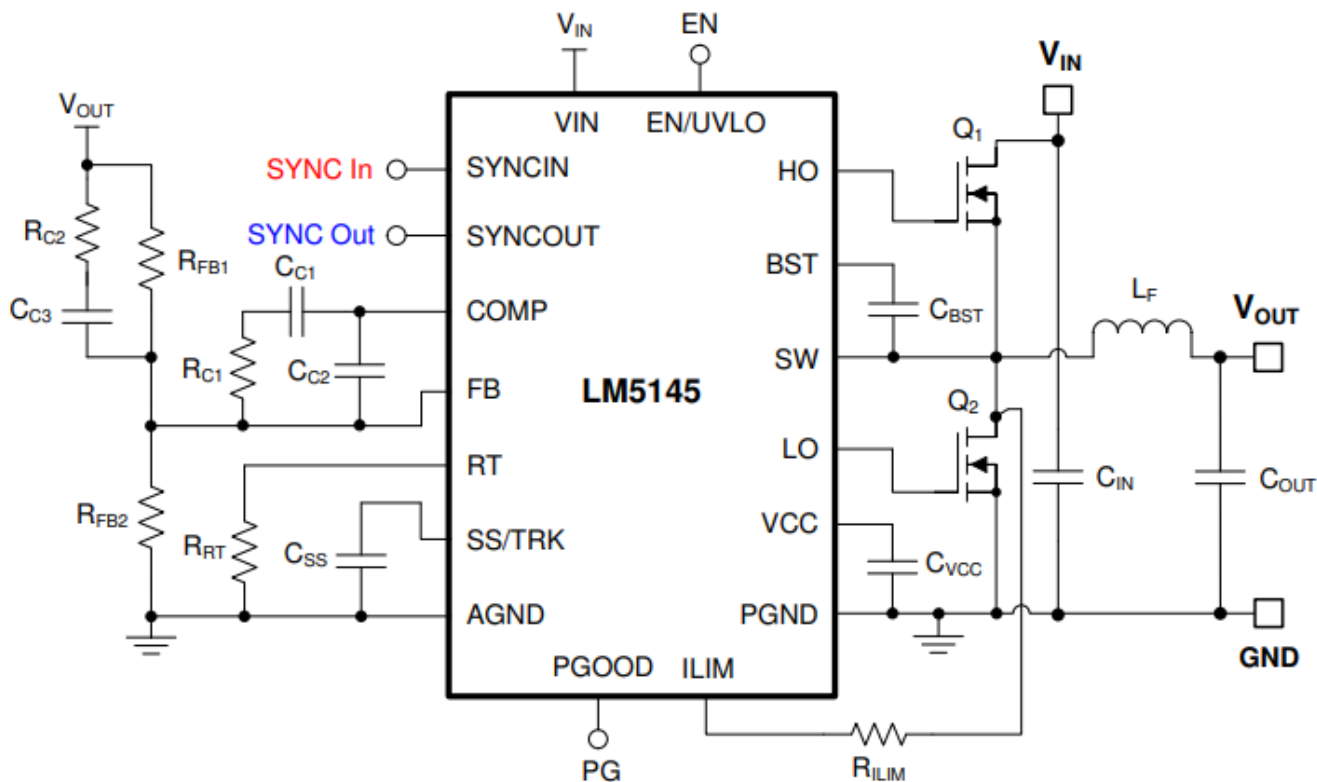


图 2. LM5145 典型应用电路

单层铝基 PCB 板的噪声来源主要包括：电源/地回路电感引起的地弹与电源纹波、数字开关瞬态电流耦合、缺乏完整参考平面导致的串扰与辐射、热噪声，以及外部 EMI 耦合——因单层结构无法实现多层板的低阻抗电源/地平面和受控回流路径，噪声抑制能力显著受限。其中占主导地位的是电源与地之间的噪声，铝基板通常仅一层导电层（铜走线），无独立电源/地平面。开关器件（如 DC-DC、MOSFET）或高速数字 IC 的快速 di/dt 在高环路电感的走线回路中产生显著电压波动（ $\Delta V = L \cdot di/dt$ ），表现为电源纹波、地弹。接下来针对这种噪声常见的异常现象和解决方案进行分析说明。

首先，在这样的设计中第一类常见问题是开节点噪声导致的输出纹波偏大，包含动态和稳态纹波。开关电源振铃是开关电源中常见的一个问题，但是由于单面板走线层和铝基层之间的层间电容效应，会导致振铃过大从而导致

输出纹波偏大，因此最直接的解决思路就是增加局部滤波：在 SW 节点与 GND 间加 RC 缓冲电路（典型值 $R=2-10\Omega$, $C=100-1000\text{pF}$ ，实测振铃频率后调参）；输出端用 π 型 LC 滤波（小电感 + 多陶瓷电容并联 $10\mu\text{F}/0.1\mu\text{F}/0.01\mu\text{F}$ ），注意电感 DCR 与饱和电流。其次在 PCB 布局上也要尽可能减小热回路面积。

除了开关节点滤波之外，在 COT 控制的 DCDC 产品中，前馈电容的合理设计也能够优化输出纹波，尤其是动态纹波。前馈电容并联在反馈分压电阻上，将输出电压的开关纹波（非直流衰减后）直接耦合至反馈电压，提升环路带宽与相位裕度，尤其在使用低 ESR 陶瓷电容时防止振荡。前馈电容的取值无统一解析公式，通常按“提供足够交流纹波注入以维持环路稳定”经验选取，典型值为 $10-100\text{pF}$ ；若需估算，可基于反馈分压网络与穿越频率近似计算： $C_{ff} \approx 1 / (2\pi \times R1 \times f_c)$ ，其中 $R1$ 为上分压电阻、 f_c 为目标穿越频率（常取开关频率的 $1/5-1/10$ ），但最终需实测环路稳定性验证，TI 也有一篇应用文档对这部分进行了详细的仿真说明，ZHCA058，可以参考，以下是基于 TI TPS548B27 EVM 在以下条件下的动态纹波测试来说明前馈电容对输出动态纹波的影响：2ms/4ms, 3A/us, 0.015 to 10A dynamic load，有无前馈电容。可以看出，合适的前馈电容能够大幅优化动态纹波性能。

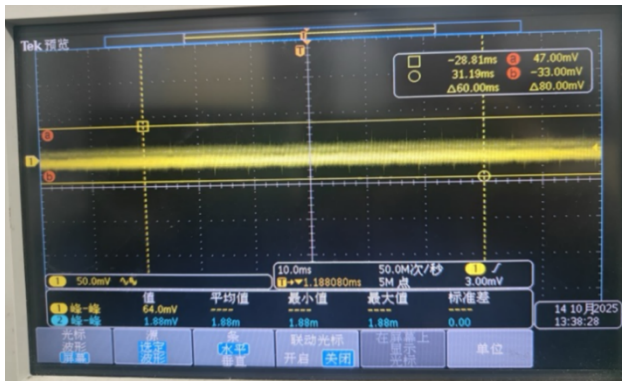


图 3. TPS548B27 带 120pF 前馈电容(left)

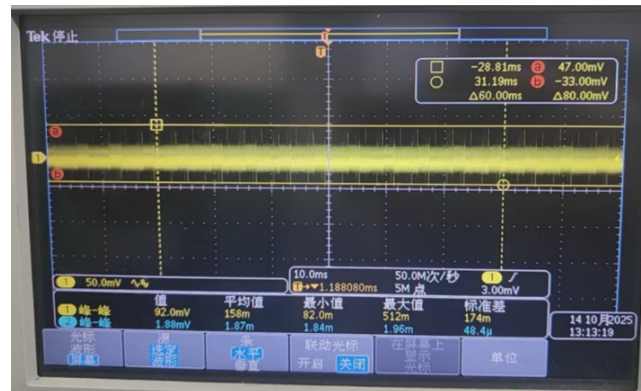


图 4. TPS548B27 不带 120pF 前馈电容(right)

第二类在这种设计中常见的问题便是输出电压异常，最直接的现象就是输出电压跟设计值出现显著误差。这个问题一般都是由于电源噪声导致芯片 FB 脚引入噪声导致输出电压异常；同样这个问题也需要从 PCB 本身以及电路应用两个方面进行优化，在 PCB 本身，FB 引脚下分压电阻要尽可能的靠近芯片，并且尽量与最近的 GND 进行连接，从而减少噪声来源。

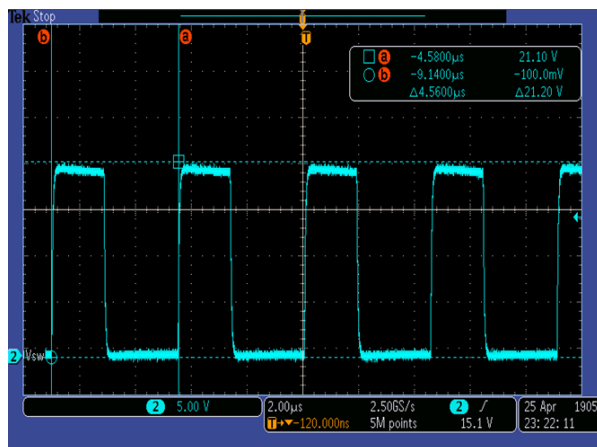


图 5. 20Vin, 8.4Vout with 1A load, CH2=SW 33pF

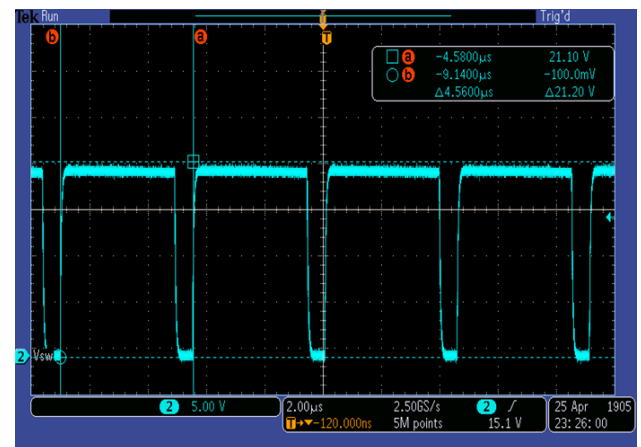


图 6. 20Vin, 17.12Vout with 1A load, CH2=SW 150pF

应用级就是要增加滤波电容来对 FB 噪声进行滤除，但是要注意，FB 对地电容不能过大，过大可能会影响环路，导致更严重的问题，一般在工程实际中需要从 $10-100\text{pF}$ 中先进行尝试，然后慢慢增大观察实验现象。以上是基于

LM5145 输入 20V，输出设定值为 17.1，1A 负载下的测试结果，可以看到在 33pF 时，输出电压异常，当提高到 150pF 时，输出电压恢复正常。

最后，除了输出异常这类明确的应用端问题外，噪声还会导致环路异常等诸多问题，对于布局的优化也是非常重要的一方面，除了上文提到的开关节点和 FB 点布局思路，在整个地平面的设计上也需要非常小心，首先 AGND 和 PGND 要分开，以 LM5145 为例，RT,SS,SYIN,FB 应该连接到 AGND.FB,VIN,ILIM EP 需要连接到 PGND；其次要尽可能压缩开关电流环路——将输入陶瓷电容、开关管、电感尽量紧贴布局，环路面积最小化（必要时用“回流地岛”局部铺铜造低感回路）；多点、就近放置去耦电容——IC 电源引脚旁配 0.1 – 1 μ F X7R 陶瓷电容（<5 mm 距离）磁性元件（电感/变压器）远离敏感模拟电路，必要时加铜皮屏蔽（接地）抑制辐射；若允许，于铝基板非绝缘层侧（金属基）局部开槽/挖空，避免功率回路下方形成涡流损耗或耦合（需确认绝缘层耐压）；

小结

本文以 LM5145 在单层铝基板上的应用为背景，重点阐述了单层铝基板在散热（Thermal）方面的核心优势，以及在噪声（Noise）抑制方面所面临的挑战。针对 FB、SW 和 GND 节点的噪声问题，提出了具有针对性的解决方案，并结合实际测试结果，验证了上述方案的有效性。

参考文献

1. LM5145 数据手册 <https://www.ti.com/product/LM5145>
2. PCB 铝基板完整使用指南. <https://www.jiepei.com/design/3287.html>
3. TPS548B27 数据手册 <https://www.ti.com/product/TPS548B27>

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月