

# 开关电源电磁干扰抑制电路设计与滤波优化

张红旭

贵州航天控制技术有限公司 贵州 贵阳 550009

**【摘要】**：开关电源在高频、高效率工作的条件下易产生电磁干扰，影响周围电子设备的正常运行。通过对电磁干扰源的分析，结合电路拓扑结构和关键元件参数优化，可有效降低干扰幅值。滤波设计在抑制高频干扰和改善系统传导性能中起关键作用，不同滤波器拓扑和元件布局对干扰抑制效果存在显著差异。通过合理选择滤波器类型、调整电感与电容参数，以及优化电路布局与接地策略，可在不影响电源性能的前提下提升电磁兼容性。本文围绕开关电源的干扰特性，探讨了基于电路设计与滤波优化的综合抑制措施，为高性能开关电源的电磁干扰控制提供技术支持。

**【关键词】**：开关电源；电磁干扰；滤波优化；电路设计；电磁兼容

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.036

## 引言

开关电源在现代电子设备中被广泛应用，其高频开关特性在带来效率优势的同时，也成为电磁干扰的重要来源。干扰不仅影响电源自身性能，还可能对周边敏感设备造成干扰，限制了高频电源的应用环境。通过深入分析干扰产生机理，可发现电路拓扑结构、元件参数和布局方式在干扰传播中扮演关键角色。滤波技术能够针对不同频段的干扰进行有效抑制，但滤波元件的选择与配置对系统性能有直接影响。对电路设计与滤波方法进行优化，可在保持电源效率和稳定性的同时，显著改善电磁兼容性，为高密度、高性能电子系统提供可靠保障。

## 1 开关电源干扰特性分析

### 1.1 高频开关信号干扰来源

开关电源在工作过程中，电源开关元件高速切换电流，使电压和电流在瞬间发生剧烈变化，这种变化会产生宽频带的电磁干扰信号。开关动作的上升沿和下降沿速率越快，产生的高频成分就越明显，这些高频信号不仅通过电源自身线路传播，还可能通过辐射方式影响周围电子器件<sup>[1]</sup>。电源中开关管、二极管、功率电感和电容器等关键元件的寄生参数也会增强干扰效应，例如寄生电容和电感会形成谐振回路，使特定频率的干扰信号被放大。元件选择与开关频率匹配不合理时，干扰幅值会进一步升高，对系统电磁兼容性能带来明显压力。

### 1.2 干扰传播路径及机制

干扰信号在开关电源中通过多种路径传播，包括导电路径和辐射路径。导电路径主要沿电源输入输出线缆传导，干扰能量通过电源接口进入负载或外部电网，而辐射路径则使电磁能量以电磁波形式向外扩散，影响周边敏感电路。电路布局和接地结构会改变干扰信号传播效率，不合理的布线可能形成环路，增强高频噪声的耦合。此外，电源模块内部元件之间的电磁耦合、导体之间的寄生电容以及电感耦合效应都会改变干扰的频谱分布，使部分频段的干扰信号更加突出。对干扰机制的理解有助于针对性地采取抑制措施。

### 1.3 关键元件对干扰影响

电源中的关键元件对干扰特性有直接影响，开关管的开关速度和导通电阻决定了瞬态电压电流的陡峭程度，寄生电容和寄生电感则可能形成谐振峰，放大高频干扰信号。功率二极管的反向恢复特性在开关转换过程中产生尖峰电流，进一步增加高频干扰。电源电感和电容不仅承担能量存储功能，其品质因数和电气布局也影响滤波效果与干扰耦合。元件布置接近度、封装类型和引脚布局会改变电磁场分布，使局部干扰在电路板上集中或扩散，对整体电磁兼容性能产生明显影响。

## 2 电磁干扰问题诊断方法

### 2.1 干扰测量与评估技术

在高频开关电源中，干扰信号幅值和频率范围广泛，准确测量成为评估系统电磁性能的关键环节。测量设备通过高精度示波器、频谱分析仪和电流探头捕捉导体上的电压电流波形，揭示干扰信号的瞬态特性。针对传导和辐射干扰，采用线缆耦合电压测量与空间电场强度测试相结合的方法，可以全面反映干扰的传播趋势和能量分布<sup>[2]</sup>。评估过程需考虑测量环境对信号的影响，例如接地条件和屏蔽效果，以及仪器带宽和响应速度可能造成的测量偏差。通过建立标准化的测量流程，能够对不同工作状态下的开关电源干扰进行量化比较，为后续优化提供数据支撑，并便于分析不同频段的干扰强度和潜在风险。

### 2.2 频谱特性识别分析

开关电源产生的干扰信号呈现宽频谱特性，频率分布从几十赫兹延伸至数百兆赫兹甚至更高，频段中可能存在尖峰和连续带状干扰。通过频谱分析仪获取频域图像，可以直观识别主要干扰能量集中区，区分开关动作、谐振现象以及寄生耦合产生的信号特征。频谱数据能够揭示干扰的源头和传播规律，频率成分与电路拓扑关系紧密，部分频段干扰可能通过电感、电容或布线形成共振峰。进一步对比不同工作模式下的频谱变化，有助于判断负载波动、开关频率调制以及环境因素对干扰特性的影响，从而为针对性抑制策略提供理论依据。见图1所

示。

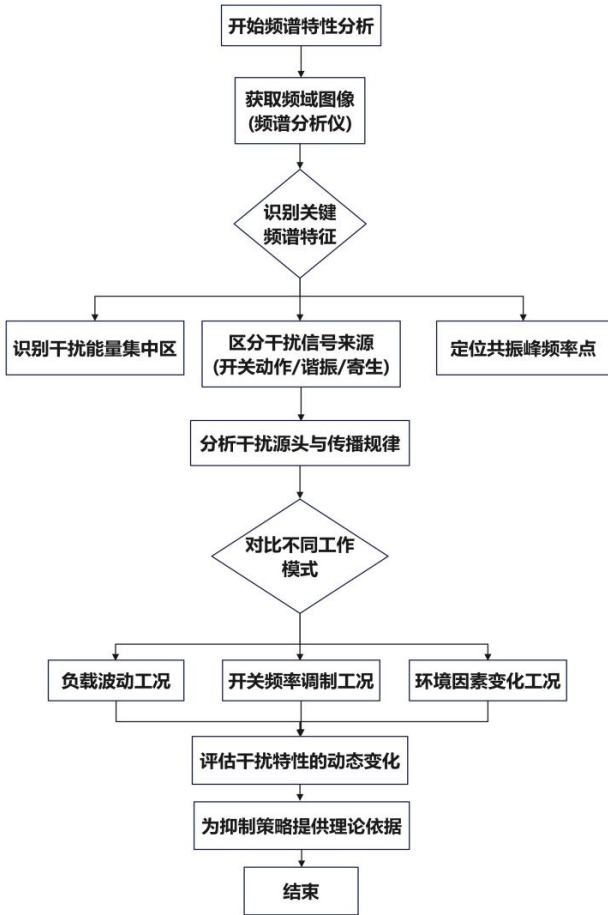


图1 开关电源频谱特性识别分析图

### 2.3 敏感节点定位策略

开关电源中干扰信号沿着电路传播，局部元件和关键节点往往成为干扰集中的区域。通过沿电源路径逐点监测电压电流波形，能够识别干扰敏感的连接点、滤波器前后端及输入输出接口。对不同元件和布线位置的电磁场分布进行模拟和测量，可以发现局部谐振和耦合效应导致的高频噪声集中区域。敏感节点的定位不仅依赖实验测量，也结合仿真分析评估寄生参数影响，例如电容和电感寄生值引发的干扰峰值。掌握敏感节点分布规律有助于在设计优化阶段调整布线、接地及滤波布局，从而有效降低电源整体干扰水平，改善电磁兼容性能。

## 3 滤波器优化设计策略

### 3.1 滤波器拓扑类型选择

滤波器拓扑的选择直接影响开关电源对电磁干扰的抑制能力。不同拓扑结构在对高频与低频干扰的响应上表现差异明显，单级 LC 滤波器适合抑制特定频段的干扰，而  $\pi$  型或 T 型滤波器在宽频带范围内提供更均衡的抑制效果。设计过程中需要考虑输入输出端口阻抗匹配和负载特性，以保证滤波器在目标频段内能有效衰减干扰，同时不引入额外的信号反射或功率损耗<sup>[1]</sup>。拓扑选择还受限于实际电路空间和元件可用性，结合

电磁仿真分析能够评估不同结构对系统干扰频谱的影响，从而筛选最适合的滤波器配置。合理拓扑布局能够改善电源的频域响应，使高频尖峰得到抑制而低频信号保持稳定，提升整体电磁兼容水平。

### 3.2 电感电容参数匹配优化

滤波器中电感和电容参数的匹配关系决定了抑制频段和滤波效率。电感值过大可能导致开关电流波形畸变，增加导通损耗，而电容值不足会使高频干扰未能充分衰减。通过分析干扰信号的频谱特性，可针对主要干扰频段调整电感和电容的阻抗，使滤波器在关键频率点形成最优衰减特性。同时元件的寄生参数如电感直流电阻、分布电容等也会对滤波效果产生影响，精确计算这些因素可避免共振峰的出现。优化参数组合不仅需要考虑滤波性能，还需兼顾系统稳定性和负载响应，通过实验验证和仿真模拟相结合的方式，可以达到理想的滤波效果，实现干扰幅值的显著降低而不影响电源效率。

### 3.3 多级滤波器组合效果分析

多级滤波器组合能够在不同频段实现分层抑制，提高开关电源的电磁兼容能力。低频干扰可通过输入端一级滤波器衰减，而高频尖峰信号则由输出端多级滤波器进一步抑制，不同级联滤波器的频率响应相互补充，使干扰能量在传导路径中逐步衰减。组合设计需要注意各级滤波器之间的阻抗匹配，避免信号反射和谐振现象，同时考虑元件布局对电磁场分布的影响，多级结构可以分散局部高频干扰集中区，改善系统整体干扰特性。仿真与实验分析显示，多级滤波方案在抑制宽频带干扰、降低谐波和尖峰信号方面效果显著，同时对电源稳定性影响较小，为高性能开关电源提供可靠的滤波支持。

## 4 电路布局与接地优化措施

### 4.1 元件布局对干扰的影响

元件布局在开关电源中对电磁干扰的强弱具有直接作用。高频开关元件如果彼此间距过近或与敏感信号线并行布置，会通过电磁耦合增加干扰幅值，尤其是尖峰信号容易在板上局部集中。由环路电流产生的磁场辐射强度与环路面积成正比，可近似表示为  $E \propto A \cdot I \cdot f^2$ ，其中 A 为环路面积，I 为电流，f 为频率。元件排列顺序和方向会影响电流回路的长度和环路面积，过大的环路会增强磁场辐射，使干扰通过导线或 PCB 层间耦合传播到其他模块<sup>[4]</sup>。布局优化需要兼顾热管理与信号完整性，将开关元件、功率电感、电容和二极管合理分布，同时保持高频信号路径尽量短且分离敏感信号线路，可显著减小干扰耦合和谐振现象。通过仿真与实验验证布局调整效果，可以找到干扰最小的元件配置方式，提升电源整体的电磁兼容水平。

### 4.2 接地方式与回路设计优化

接地结构在抑制干扰中起到核心作用，不同接地方式对回

路电流路径和电磁场分布有显著影响。单点接地可以减少回路环路面积,有利于抑制高频干扰,但在多模块电源中容易引入电压漂移或局部电流集中。多点接地能够分散高频电流,降低局部电磁场强度,但需注意避免形成环路引起共振。优化回路设计时,需要结合 PCB 层叠结构,将功率回路和信号回路合理分层,使用地平面和分区接地策略减少互相干扰,同时调整回路宽度和过孔位置以降低寄生电感。科学的接地与回路设计不仅能够衰减干扰,还能改善系统稳定性,使电源在复杂负载条件下保持可靠运行。

### 4.3 布线与屏蔽技术应用

布线方式对干扰传播路径起决定作用,长而平行的信号线容易形成天线效应,使高频噪声辐射扩散。采用短且直的布线、避免高频信号线交叉,能够有效降低干扰耦合。关键敏感节点可通过增加屏蔽或采用金属地层隔离,削弱电磁场的外泄,并抑制电源模块内部的谐振效应。屏蔽材料选择和接地方式直接影响衰减效果,结合 PCB 层间屏蔽和金属外壳,可在导电和辐射两方面减少干扰传播。布线和屏蔽技术应用不仅改善干扰特性,还对系统温升和信号完整性产生正面影响,通过合理布局和屏蔽设计,电源在高频工作状态下能够保持较低的干扰水平,为整体电磁兼容提供坚实保障。

## 5 抑制效果验证与性能提升

### 5.1 抑制措施实验对比

通过在实际开关电源系统中实施不同抑制策略,可以清晰地观察各方案对干扰幅值和频谱特性的影响。将单级滤波、优化布局、改进接地方式和多级滤波组合应用在同一电源模块上,测量输入输出端的干扰电压和电流波形,得到频谱图进行对比分析。实验结果显示,不同抑制措施在不同频段表现出明显差异,例如高频尖峰在多级滤波和屏蔽布局调整后显著降低,而低频谐波主要受输入端滤波和回路优化控制<sup>[1]</sup>。通过数据对比,可以判断每种措施在特定干扰频段的贡献,并进一步优化参数组合,使整体抑制效果达到最大化,同时保证系统功率和工作效率不受明显影响。该对比实验为选择最优抑制策略

提供了直观依据,并有助于理解各措施之间的协同作用。

### 5.2 系统稳定性与兼容性验证

抑制措施的实施需要兼顾系统稳定性和电磁兼容性,通过多工况测试和负载变化实验,可以评估电源在不同工作条件下的表现。电压和电流波动特性、负载响应速度以及温升变化都被纳入监测范围,以保证滤波和布局优化不会引发额外不稳定现象。兼容性测试中,将电源置于多种典型电磁干扰环境下,观察其对周围设备的影响及自身抗干扰能力。测试结果显示,经过优化的滤波和布局方案在保持输出电压稳定的同时,有效降低了干扰耦合到其他模块的幅度。

### 5.3 综合优化后的性能评价

结合实验数据和仿真分析,可对整体抑制方案进行综合性评价。优化后的系统在广频段干扰抑制方面表现出明显优势,高频尖峰、电压波纹和谐波成分均得到有效降低,输入输出端的噪声幅值大幅下降。滤波器、电感电容参数以及布局和接地策略协同作用,使干扰信号在传导和辐射路径上均受到抑制,同时系统效率保持在高水平。评价过程中也考虑了功率损耗、热特性及长期可靠性,确保抑制效果可持续且不会影响正常运行。综合分析表明,通过电路设计、滤波优化和布线布局的联合措施,可以显著提升开关电源的电磁兼容性能,为复杂电子系统提供稳定可靠的电源环境,同时实现了抑制能力与性能之间的平衡。

## 6 结语

抑制开关电源电磁干扰的效果在实验和分析中得到了充分体现,多种滤波优化措施、电路布局调整以及接地设计改进共同作用,使系统在宽频带范围内的干扰幅值显著下降。优化后的电源在保持高效率 and 稳定性的同时,对敏感节点的干扰耦合得到有效控制。多级滤波和合理布局不仅改善了传导干扰,还显著降低了辐射噪声,确保电源在复杂电磁环境中维持可靠运行。综合性能评价显示,电磁干扰抑制与系统性能实现了良好平衡,为高性能电子系统提供了稳定、低干扰的电源支持。

### 参考文献:

- [1] 陈铁柱,林俊威,刘康卓,等.反激式开关电源电路设计缺陷失效案例分析[J].电子质量,2025,(12):68-74.
- [2] 郭清彬,黄龙杰,林建军,等.电磁干扰下低压差线性稳压器损伤检测方法研究[J].自动化仪表,2025,46(12):90-94.
- [3] 王昭斐.高频开关电源技术在智能变电站中的应用[J].光源与照明,2025,(11):196-198.
- [4] 李嘉锋.开关电源电磁兼容特性研究[D].沈阳工业大学,2022.
- [5] 刘思瑞.考虑开关电源传导电磁干扰的测试性设计研究[D].哈尔滨工业大学,2021.