

电子电路抗干扰设计要点与电磁兼容处理方法

李志远

沈阳地铁集团有限公司 辽宁 沈阳 110000

【摘要】：现代电子设备向着高频化、小型化、集成化的方向迅速发展，电路的工作密度以及信号传输速度不断上升，电磁干扰的问题越来越严重，直接影响到电子系统运行的稳定程度、测量的准确度和使用寿命。电磁兼容性已经成为电子电路设计的主要指标，也是电子产品量产使用、获得认证的重要依据。本文系统论述电子电路电磁干扰的产生机理和传播途径，从器件选择、PCB 布局布线、接地设计、电源系统改善等角度整理出抗干扰主要的设计要点，针对传导干扰、辐射干扰、静电干扰等各种电磁兼容问题给出相应的处理办法，结合工程实测案例和数据验证设计方案的有效性，总结出全流程电磁兼容优化策略，给工业控制、智能电子、通信设备等领域电路抗干扰设计提供理论支持和工程实践借鉴。

【关键词】：电子电路；抗干扰设计；电磁兼容；PCB 设计；接地技术；噪声抑制

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.013

1 电子电路电磁干扰机理与传播特性

1.1 电磁干扰主要来源

电子电路的电磁干扰分为内部干扰和外部干扰两种，两种干扰叠加在一起就形成了复杂的电磁干扰环境。内部干扰是由电路系统本身的工作过程所产生的电磁噪声，是电磁兼容设计的主要控制对象。数字电路高低电平快速翻转产生高频开关噪声，功率器件通断切换引起电压电流突变，电源模块整流滤波残留纹波、时钟电路高频振荡信号、信号传输反射串扰等，都是典型的内部干扰源。另外，由于线路阻抗不匹配、接地不好、器件布局杂乱等原因，会增大内部干扰的强度。

外部干扰是由设备工作环境里各种电磁信号引起的，具有随机性、突发性、多样性等特点。工业现场变频器、继电器、大功率电机等设备工作时会产生强电磁辐射和传导噪声，自然环境中雷电感应、静电积累产生的高压脉冲干扰，电网电压波动、浪涌冲击通过供电线路侵入电路系统，无线通信信号、高频射频设备的辐射信号都会对微弱信号电路造成干扰。外部干扰强度同环境复杂度成正比，是决定电子设备在户外、工业环境中能否稳定工作的主要因素。

1.2 电磁干扰传播方式

电磁干扰的传播途径主要有传导耦合、辐射耦合和近场耦合这三种，不同的传播方式所造成的干扰特性以及抑制方法也存在着明显的差别。传导耦合是干扰信号经由导线、电源线、信号线、地线等导体直接传递，主要影响低频、中频干扰信号，干扰能量经由电路回路直接对敏感器件产生影响，导致供电纹波过大、信号采集失真等状况出现，是低压电子电路中最常见的干扰类型。

辐射耦合就是干扰源把能量以电磁波的形式发射到空中，然后通过空间传输进入被干扰的电路中，属于高频干扰信号的一种。高频开关电路、高速信号线、未屏蔽的接口线路都会向外辐射电磁波，空间中高频电磁波也会被电路线路接收，造成

高频噪声干扰，影响高速信号传输精度。近场耦合包含电场耦合和磁场耦合，干扰源和敏感电路距离接近的时候，凭借空间电场或者磁场传递能量，大多出现在 PCB 内部模块之间、设备内部线路之间，容易造成局部信号串扰。

2 电子电路核心抗干扰设计要点

2.1 器件选型抗干扰设计

器件选型是抗干扰设计的源头，器件本身电磁噪声水平及抗干扰能力，直接影响到整个电路系统的基础电磁兼容性。设计时要按照电路的工作频率、信号类型、功率等级来挑选低噪声、高稳定性、电磁兼容性好的元器件。数字电路优先选择低速、低辐射的逻辑器件，避免因为追求高主频而使高频辐射噪声增大；模拟微弱信号电路选用低漂移、低噪声的运算放大器和采样器件，减少器件固有的噪声对微弱信号的干扰。

电源器件选择要重视稳压精度和噪声抑制水平，低压供电场合先选用低压差线性稳压器，其电源抑制比较好，能很好地抑制高频电源的纹波，大功率动态供电场合搭配开关电源并加装多级滤波器件，达到供电效率和抗干扰性能的兼顾。同时还要合理选择滤波电容、磁珠、共模电感等抗干扰器件，根据干扰频段选择相应的器件，低频干扰用大容量电解电容滤波，高频干扰用小容量陶瓷电容滤波，高频共模噪声用共模电感抑制。严禁闲置器件引脚悬空，数字芯片闲置引脚统一接地或者接固定电平，模拟器件闲置引脚做闭环处理，避免悬空引脚感应电磁噪声。

2.2 PCB 布局布线抗干扰设计

PCB 是电子电路的载体，布局布线是否合理直接影响到电路串扰的强弱、辐射的大小以及干扰的抑制能力，是抗干扰设计的主要部分。布局设计要严格按照分区隔离的原则来执行，将不同的电路模块物理上进行划分，避免高低压模块、强弱信号模块、数字模拟模块混杂布局。将高频振荡电路、功率驱动电路、开关电路等强干扰模块集中布置在远离传感器采样、精

密放大、信号采集等敏感电路模块的位置上，留出足够的隔离间距来减小模块之间的近场耦合干扰。

PCB 布线要控制线路环路面积，电磁辐射强度和电流环路面积成正比，高频信号线、功率电源线要尽量缩短线路长度，收紧布线环路，最大限度地减少电磁辐射和磁场耦合干扰。高速信号线严格按照布线规则进行布置，相邻信号线之间留有足够的间距以减小信号串扰，线路拐角处用四十五度折线代替直角拐角，防止直角布线产生的信号反射和高频谐波噪声。电源线和地线用宽幅布线的方式布置，减小线路阻抗，降低供电电压降和阻抗耦合干扰，高频电源线全程配有滤波器来抑制传输过程中产生的噪声叠加。

多层 PCB 板要设置专用电源层和地层，形成完整的平面屏蔽结构，内层布设高速信号线，依靠上下地层形成天然屏蔽屏障，隔绝外部辐射干扰和内部信号外泄。时钟信号、高速差分信号等重要信号线优先内层布线并且包地，线路终端匹配对阻值的限流电阻，抑制信号反射震荡，提高信号完整性。

2.3 接地系统抗干扰设计

接地设计是电磁兼容抗干扰最有效、最基础的方法，不合理的接地会造成地电位漂移、地环路干扰、多点电位差等现象，是电路干扰超标的最主要的原因。接地设计要依照电路的工作频率以及模块的种类来挑选相应的接地方式，低频电路采取单点接地的方式，把所有的电路模块的地线集中到一个公共接地参考点上，防止出现多点接地产生地环路的情况，从而抑制低频磁场耦合干扰。

高频电路采用多点接地方式，减小接地线路长度，减小地线阻抗，减小高频信号的接地反射和辐射干扰。数字地、模拟地、功率地、屏蔽地要严格分开，各类地线单独敷设，最后汇集到公共接地点，防止大功率功率电路的地电流干扰模拟微弱信号电路。屏蔽外壳、金属结构件、连接器金属外壳均应可靠接地，形成完整的屏蔽接地系统，释放静电积累，屏蔽空间电磁辐射。

2.4 电源系统抗干扰设计

电源系统是电磁干扰传播的主要途径，也是电路噪声的主要来源，电源抗干扰优化可以大大提高整个电路的电磁兼容性。电源设计采用多级滤波结构，输入端设滤波电路，消除电网传导干扰，输出端配稳压滤波器件，减弱负载动态工作时产生的噪声。常用的滤波结构有型滤波、LC 滤波、RC 滤波结构，根据干扰频段选择合适的滤波方式，低频纹波用多级 RC 滤波，高频噪声用 LC 滤波结构。

电路中所有的芯片电源引脚都就近配置去耦电容，电容紧贴引脚布置，缩短供电回路，及时吸收芯片工作产生的高频开关噪声，稳定引脚供电电压。对于大功率开关电源，在开关管的通断过程中加入缓冲电路，以减小开关管通断时的电压尖峰

和电流脉冲，降低电源高频辐射。同时实现电源分区供电，强干扰功率模块、高频模块和敏感信号模块各自有独立的供电回路，防止公共电源阻抗造成的模块间噪声干扰。

3 电子电路电磁兼容核心处理方法

3.1 传导干扰处理方法

传导干扰主要发生在 150kHz 到 30MHz 的频段内，经由电源线、信号线传递，超标之后会造成设备供电不稳定，信号失真，电网噪声超标等状况。传导干扰的处理主要就是切断干扰传导路径、衰减传导噪声，主要用滤波、阻抗匹配、线路隔离等技术手段。针对电源传导干扰，在设备电源输入端加装共模电感、安规电容、滤波电阻等组成的专用滤波网络，共模电感抑制线路共模噪声，安规电容滤除差模噪声，双重衰减电源传导干扰。

信号线路传导干扰用串联限流电阻、并联滤波电容的方式抑制，低速模拟信号线路搭建 RC 低通滤波电路，过滤高频传导噪声，高速数字信号线路采用磁珠滤波，在不影响信号传输的情况下衰减高频噪声。多级滤波系统要控制器件阻抗匹配，防止阻抗失衡造成噪声谐振放大，滤波器件尽量靠近干扰源布置，缩短未滤波线路长度，防止滤波后的线路二次耦合噪声。表中给出了常见的传导干扰抑制方案以及实测降噪效果。

表 1 传导干扰处理

干扰频段	150kHz-1MHz	1MHz-30MHz	30MHz-100MHz
干扰类型	电源低频传导噪声	线路高频共模噪声	信号线路差模噪声
处理方案	π 型电源滤波网络	共模电感+高频瓷片电容	磁珠+终端匹配电阻
处理前噪声值	520mV 纹波	45dB 干扰幅值	38dB 干扰幅值
处理后噪声值	48mV 纹波	8dB 干扰幅值	6dB 干扰幅值
降噪效果	衰减 90.7%	衰减 37dB	衰减 32dB

3.2 辐射干扰处理方法

辐射干扰主要发生在 30MHz 到 1GHz 的高频段，是由高速线路、高频器件、开关功率电路向外辐射电磁波引起的，当辐射强度超标时会对周围的电子设备产生干扰，并且还会对设备自身的信号稳定性造成影响。辐射干扰处理要遵照源头抑制、路径屏蔽、末端吸收这三个处理准则。源头上改善高频电路设计，减小信号翻转速度，削减高频谐波分量，缩减高频信号线、时钟线路长度，加强电流环路，从源头削减辐射能量。

路径上使用屏蔽技术,给高频干扰模块、时钟模块、功率开关模块加装金属屏蔽罩,屏蔽罩采用高导电、高导磁的材料,高频干扰用导电屏蔽为主,低频磁场干扰用导磁屏蔽材料。屏蔽罩要完全封闭,没有缺口缝隙,而且可靠接地,防止屏蔽体未接地产生二次辐射源。设备对外接口、散热缝隙、装配间隙是辐射泄漏的主要位置,需要用加装导电泡棉、屏蔽密封条、滤波连接器等方式封堵辐射缝隙。

末端部分使用吸收器件来衰减高频辐射噪声,高频线路串联磁珠和吸收电阻,消耗高频噪声能量来抑制线路辐射。另外还要改善PCB地层的完整性,防止地层出现大面积开槽、断裂的情况,完整的地平面可以很好地屏蔽高频电磁波辐射,减小整体辐射强度。

3.3 静电与浪涌干扰处理方法

静电干扰和浪涌干扰属于突发性的脉冲干扰,静电主要来自于人体接触、设备摩擦、环境干燥积累,浪涌主要来自于电网波动、雷电感应、负载通断,两类干扰的电压幅值大、作用时间短,很容易击穿精密元器件、烧毁电路模块,是电子设备损坏的主要原因。静电和浪涌干扰处理主要是用防护钳位、泄放通路、隔离缓冲来完成的。对设备的所有对外接口、按键接口、通信接口配置防护器件,串联瞬态电压抑制二极管、压敏电阻、静电保护芯片,快速钳制突发高压脉冲,把瞬时高压限制在器件的耐受范围内。同时建立完善的静电泄放通道,设备金属外壳、屏蔽结构、接地端子可靠接地,把积累起来的静电能量迅速导入大地,防止静电堆积击穿器件。

参考文献:

- [1] 梁岩.抗干扰技术在电子电路设计中的应用研究[J].信息记录材料,2026,27(1):99-101.
- [2] 刘永江.电子电路设计中抗干扰技术的应用探究[J].数字通信世界,2025,(6):35-37.
- [3] 张树宏.自适应滤波技术的串行通信收发器抗干扰芯片设计[J].现代信息科技,2024,8(23):1-4+10.
- [4] 王超.抗干扰技术在电子电路设计中的应用[J].数字通信世界,2024,(1):122-124.
- [5] 李思愚,张燕霞,户文刚.电子控制设备的抗干扰设计研究[J].科技资讯,2022,20(14):47-49.

3.4 软件辅助抗干扰处理方法

电磁兼容处理不能只依靠硬件设计的改进,软件算法补偿和逻辑防护可以提高电路系统抗干扰的能力,达到软硬件协同抗干扰的目的。对于模拟信号的采集干扰用数字滤波算法去掉采集的数据中突变的干扰点,使信号曲线更加平滑,提高采集精度。对高频周期性干扰可以使用自适应滤波算法准确地过滤掉噪声信号,只留下有效信号分量。

程序运行层面增加抗干扰防护机制,设置硬件看门狗和软件看门狗,当电磁干扰造成程序跑飞、死机、死循环时,自动复位重启程序,保证系统正常工作。数据传输过程中加入校验,使用奇偶校验、CRC校验、重传等方式防止干扰造成的数据传输错误、数据丢失。另外,对程序的运行逻辑进行改进,消除高频中断频繁产生,减小数字电

4 结论

本文从电子电路电磁干扰的产生机理和传播特性入手,对器件选型、PCB布局布线、接地设计、电源系统优化四个主要抗干扰设计要点进行了系统的整理,针对传导干扰、辐射干扰、静电浪涌干扰的硬件处理方法以及软件辅助抗干扰策略进行了详细的阐述,并且结合工业温控电路工程案例对优化方案的效果进行了验证。经过实践证明,科学的抗干扰结构设计加上系统的电磁兼容处理,可以有效地抑制电路内外的电磁干扰,解决信号失真、设备故障、电磁超标等各方面的问题,大大提高了电子电路的工作稳定性和测量精度,也提高了电子电路对环境的适应性。