

电磁兼容技术在现代电子设备中的设计与实现

朱学兵

上海鸣志自动控制股份有限公司 上海

【摘要】随着电子设备工作频率提升和集成度提高,电磁兼容问题成为影响系统稳定性与性能的关键因素。电磁干扰来源广泛,既包括外部复杂电磁环境的影响,也涉及设备内部高速信号与电源噪声的耦合效应。为提升电磁兼容性,需从电路设计、PCB 布局、结构屏蔽及仿真分析等多个层面进行系统优化。新兴技术的发展进一步推动电磁兼容设计向智能化、高精度方向演进,为应对未来电磁环境挑战提供新的解决方案。

【关键词】电磁兼容; 电子设备; 抗干扰设计; 稳定性; 复杂电磁环境

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250053

Design and implementation of electromagnetic compatibility technology in modern electronic devices

Xuebing Zhu

MOONS', Shanghai

【Abstract】 With the increasing operating frequency and integration level of electronic devices, electromagnetic compatibility has become a key factor affecting system stability and performance. Sources of electromagnetic interference are widespread, including the impact of complex external electromagnetic environments as well as coupling effects of high-speed signals and power noise within devices. To improve electromagnetic compatibility, systematic optimization is required across multiple aspects including circuit design, PCB layout, structural shielding, and simulation analysis. The development of emerging technologies is further driving electromagnetic compatibility design toward intelligent and high-precision directions, providing new solutions to address future challenges in electromagnetic environments.

【Keywords】 Electromagnetic compatibility; Electronic devices; Immunity design; Stability; Complex electromagnetic environment

引言

现代电子设备广泛应用于通信、医疗、交通与工业控制等领域,其运行环境中的电磁干扰问题日趋严重。高频信号传输、密集布线以及多设备共存导致电磁兼容性要求不断提升。电磁兼容技术通过抑制干扰源、切断传播路径、增强系统抗扰能力,确保设备在复杂电磁环境下正常运行。面对新兴技术带来的新挑战,电磁兼容设计已成为产品开发中不可或缺的核心环节,对提升电子设备性能与可靠性具有重要意义。

1 电磁兼容技术基础及其在电子设备中的角色

电磁兼容(EMC)是指电子设备在其电磁环境中正常运行,同时不对该环境中的其他设备造成不

可接受的电磁干扰的能力。这一技术涵盖了电磁干扰(EMI)与电磁抗扰度(EMS)两个核心方面,构成了现代电子系统设计中不可或缺的基础性内容。随着电子设备集成化、高频化和智能化程度的不断提高,电磁兼容问题日益复杂,其技术基础也逐步发展为涵盖理论分析、建模仿真、测试验证等多个层面的综合体系。

从物理机制来看,电磁干扰主要通过传导和辐射两种方式进行传播。传导干扰通常通过电源线、信号线等导体进行传输,而辐射干扰则以电磁波的形式在空间中传播。为了有效控制这些干扰源,电磁兼容技术引入了屏蔽、接地、滤波、布局优化等多种设计手段,并结合电路拓扑结构的合理安排,实

现对干扰的有效抑制。材料科学的发展也为电磁兼容提供了新的解决方案,如高性能吸波材料、导电屏蔽材料的应用,使得设备对外界干扰的抵抗能力得到增强。

在电子设备的设计流程中,电磁兼容技术贯穿于产品概念形成、方案设计、原型开发以及测试验证的全过程。早期的概念阶段需要明确设备所处的电磁环境及其可能受到的干扰类型,从而制定相应的兼容性指标^[1]。在硬件设计环节,电路板布线、元器件选型、接口防护等均需考虑电磁兼容因素,以降低潜在的干扰风险。系统级集成过程中,整机的屏蔽效能、接地方式以及电缆走线路径等细节都直接影响最终的电磁兼容性能。

2 现代电子设备面临的主要电磁干扰挑战

随着电子技术的快速发展,现代电子设备在功能集成度、工作频率和信号传输速率方面不断提升,同时也使得其在复杂电磁环境中的运行面临更加严峻的电磁干扰挑战。这些干扰不仅来源于外部空间的电磁场变化,也包括设备内部不同模块之间的相互耦合影响,给系统的稳定性与可靠性带来了持续性的压力。从外部干扰源来看,现代社会中无线通信设备、高压输电线路、工业自动化系统等大量共存于同一电磁空间,导致环境中背景电磁噪声水平不断上升。这种复杂的电磁环境对电子设备的正常运行构成潜在威胁,尤其是在高频段工作的设备更容易受到外界辐射干扰的影响。

由于无线网络的广泛部署,频谱资源日益紧张,不同系统之间因频率重叠而产生的互调干扰、邻道干扰等问题愈加突出,进一步加剧了电磁兼容设计的难度。设备内部的电磁干扰问题同样不容忽视。随着电路工作频率的不断提高,高速数字信号、时钟信号以及开关电源等组件所产生的谐波分量大幅增加,成为主要的内部干扰源。这些信号在传输过程中可能通过导体路径或空间辐射的方式传播至其他功能模块,造成误码、数据丢失甚至系统崩溃等故障。

多层电路板与高密度封装结构的应用虽然提升了设备的性能和集成度,但也增加了信号完整性与电源完整性的控制难度,使串扰、反射、地弹等现象更加显著^[2]。在系统级层面,多个电子设备并行运行时所形成的电磁交互关系更为复杂。特别是在车载电子、智能终端、工业控制系统等领域,多种类型设

备共用供电网络或物理接口,容易形成传导干扰的耦合路径。这种干扰不仅会影响本系统的稳定运行,还可能通过公共连接点向其他设备扩散,形成连锁反应。与此设备间的无线通信功能越来越多,如蓝牙、Wi-Fi、5G 等技术的共存,也对天线布局、频段规划和射频隔离提出了更高要求。

3 提升电子设备电磁兼容性的设计方案与实践

在现代电子设备日益复杂化的发展趋势下,提升其电磁兼容性已成为产品设计过程中不可忽视的关键环节。为了有效应对来自外部和内部的多种电磁干扰源,工程实践中逐步形成了一套涵盖电路设计、结构布局、材料应用以及系统集成等多维度协同优化的设计方案。这些方法不仅强调对干扰传播路径的控制,更注重从源头上降低干扰的产生强度,从而实现整体电磁环境的改善。在电路层面,合理的拓扑结构选择和驱动方式调整可以显著降低高频信号产生的谐波分量,减少不必要的辐射发射。通过优化功率器件的开关时序、引入软开关技术或采用扩频调制策略,能够有效抑制瞬态电流带来的传导干扰。

在模拟与数字电路之间设置适当的隔离措施,如使用磁珠、共模电感或光耦元件,有助于阻断噪声在不同功能模块之间的传播路径。电源完整性设计也成为关键考量因素之一,去耦电容的合理配置与低阻抗供电网络的构建,能够在高频工作状态下维持稳定的电压水平,避免因地弹和同步开关噪声引发的误动作。在印刷电路板(PCB)布线方面,科学的层叠结构规划和走线策略对于提升电磁兼容性能具有重要作用。通过将高速信号线布置在内层并紧邻完整的参考平面,可有效降低辐射噪声。合理安排关键信号的回流路径,确保其最小化并保持连续性,有助于减少环路面积所造成的天线效应。不同功能区域之间应保持足够的空间隔离,并尽量避免平行走线以防止串扰的发生。

对于高频接口部分,应采用屏蔽罩覆盖或带状线结构进行处理,以增强对外部干扰的抵抗能力。结构设计同样是电磁兼容性优化的重要组成部分。设备外壳的屏蔽效能直接影响整机对辐射干扰的抑制能力,因此需选用导电性良好且具备足够机械强度的材料。接缝处应采取导电衬垫或焊接工艺,确保其在宽频范围内维持良好的屏蔽效果^[3]。通风孔、显示窗口等开口部位则应采用蜂窝状屏蔽结构或金

属网进行覆盖,防止电磁能量通过这些薄弱点泄露或侵入。接地系统的设计也需兼顾安全性与电磁兼容要求,采用单点或多点接地方式应依据具体频率特性而定,以避免形成大的环路电流。随着仿真技术的进步,基于软件平台的电磁场建模分析已被广泛应用于设计前期的风险预测。

4 新技术趋势下电磁兼容技术的应用前景

在5G通信、人工智能、物联网、自动驾驶以及柔性电子等新兴领域的推动下,电磁环境变得更加密集与动态,传统设计方法已难以满足复杂系统对电磁兼容性的高精度控制需求,促使相关技术不断向更高层次的精细化、系统化方向发展。高频高速传输是当前电子系统的重要特征之一,尤其是在通信和计算领域,信号速率已突破数十吉比特每秒,导致电磁干扰问题更加突出。高频信号的谐波分量覆盖范围更广,更容易引发频段重叠和串扰现象,对屏蔽结构、滤波器性能及电路布局提出更高标准。

高速互连接口的广泛应用也加剧了信号完整性与电磁辐射之间的耦合关系,亟需通过先进的建模分析手段与低噪声设计策略进行优化,以确保系统的稳定运行。在微型化与高密度封装的趋势下,电子组件之间的物理距离进一步缩小,使得寄生电容、互感效应以及近场耦合等问题更加显著。这种紧凑的布局方式虽然提升了整体功能密度,但也增加了内部干扰路径的复杂性,对PCB布线、接地设计以及热管理提出了更高要求。为应对这一挑战,三维封装、异构集成以及先进封装材料的应用逐步增多,这些技术不仅有助于提升器件性能,也在一定程度上改善了电磁兼容特性,成为未来研究的重点方向。

人工智能和大数据分析的引入,为电磁兼容设计提供了全新的技术支持。传统的电磁兼容问题多依赖经验公式与实验测试进行评估,而如今基于机器学习的数据驱动方法能够实现对复杂电磁环境的快速建模与预测。通过对大量历史数据的学习与归纳,AI算法可以在早期设计阶段识别潜在风险区域,并提供优化建议,从而提高设计效率,降低整改成本^[4-8]。在自动化测试与故障诊断方面,智能算法的应用也有助于提升测试精度与响应速度,实现对电磁干扰问题的实时监测与自适应调整。随着无线充电、毫米波雷达、太赫兹成像等新型应用的兴起,电磁波的使用频率不断向更高波段延伸,对材料的电

磁响应特性和结构的传播控制能力提出了全新挑战。高频段下的电磁波穿透性强、衰减快,对天线设计、波导结构以及吸波材料的性能提出了更高要求。为此,新型电磁材料如超材料、可调谐吸波体、柔性导电膜层等正在被广泛研究,并逐步应用于高端电子产品的电磁兼容设计中,以提升其对外界干扰的抑制能力和自身发射的可控性。面对不断变化的技术环境和日益复杂的电磁生态,电磁兼容技术正从单一的防护手段向多学科融合的系统工程转变。

5 结语

电磁兼容技术作为保障现代电子设备稳定运行的重要支撑,正随着高频化、微型化和智能化的发展趋势不断演进。面对日益复杂的电磁环境,设计手段从电路优化到结构屏蔽,再到智能建模,逐步向系统化、精细化方向迈进。新技术的持续涌现不仅带来了新的干扰挑战,也为电磁兼容技术的创新提供了广阔空间。未来,多学科融合、先进材料应用与智能化算法的结合将成为提升设备电磁兼容性能的关键路径,推动电子产品在复杂电磁环境中实现更高水平的稳定性与可靠性。

参考文献

- [1] 陈家敏.电驱系统的电磁兼容技术分析[J].汽车电器,2025,(03):82-85.
- [2] 李思远,刘婷婷,王轩宇,等.基于电磁兼容技术的PCB设计方法研究[J].机电信息,2025,(03):31-35.
- [3] 军事微波、太赫兹、电磁兼容技术专辑发刊词[J].太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(01):3.
- [4] 梁凯,崔文兵.变压器电磁兼容技术研究[J].电力设备管理,2025,(01):277-279.
- [5] 全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246).电磁兼容试验和测量技术第3部分:射频电磁场辐射抗扰度试验:GB/T 17626.3-2023[S].中国标准出版社,2023.
- [6] 全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246).电磁兼容试验和测量技术第39部分:近距离辐射场抗扰度试验:GB/T 17626.39-2023[S].中国标准出版社,2023.
- [7] 龙光清.电磁兼容技术在电力系统自动化设备中的应用[J].自动化应用,2023,64(S2):38-40.
- [8] 郭燕.电磁兼容技术在电力系统自动化设备中的应用研究[J].科技创新与应用,2023,13(01):189-192.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS