

电磁兼容设计与测试技术研究

李松

廊坊市产品质量监督检验所 河北廊坊 065000

摘要: 随着科技的飞速发展,电子设备的广泛应用使得电磁环境日益复杂。电磁兼容(EMC)作为确保电子设备在复杂电磁环境中正常工作且不产生过多电磁干扰的关键技术,其重要性愈发凸显。本文深入探讨电磁兼容设计与测试技术,分析电磁干扰的来源、传播途径及危害,详细阐述电磁兼容设计的策略与方法,包括屏蔽、滤波、接地等技术手段,并介绍常用的电磁兼容测试仪器、场地及方法,旨在为提高电子设备的电磁兼容性提供全面的理论支持与实践指导,以应对日益严峻的电磁环境挑战。

关键词: 电磁兼容;电磁干扰;设计技术;测试技术

引言

随着电子设备的密集化应用与电磁环境复杂化,电磁兼容(EMC)成为保障设备协同工作的核心技术。电磁干扰通过辐射与传导途径,导致设备性能下降甚至失效,其危害覆盖通信、航天、医疗等多领域。各国已建立强制标准体系,我国亦通过立法推动EMC检测与应用。研究电磁兼容设计策略(如屏蔽、滤波、接地)与测试技术,对提升设备抗干扰能力、满足市场准入要求、推动电子产业高质量发展具有重要理论与实践意义。

一、电磁兼容基本概念

(一)电磁干扰(EMI)与电磁敏感度(EMS)

电磁干扰(EMI)是指设备或系统产生的电磁场对其他设备或系统产生的不利影响。这种干扰可能导致其他设备性能下降、出现故障甚至无法正常工作。例如,手机在通话过程中可能会对附近的收音机产生干扰,使其声音出现杂音。电磁敏感度(EMS)则用于衡量设备或系统在受到外部电磁场干扰时的抗扰能力。一个具有良好电磁敏感度的设备,在面对外界电磁干扰时,能够保持自身性能的稳定,继续正常工作^[1]。例如,工业控制设备在复杂的电磁环境中,需要具备较高的电磁敏感度,以确保生产过程的顺利进行。

(二)电磁辐射与传导干扰

电磁辐射是指通过空间传播的电磁波对周围环境产

生的干扰。在日常生活中,常见的电磁辐射源包括手机基站、微波炉、电脑显示器等。这些设备在工作时会向周围空间发射电磁波,如果周围有其他敏感设备,就可能受到这些电磁波的干扰。传导干扰则是通过电源线、信号线等传输媒介传播到其他设备的干扰。例如,当电网中存在电压波动或谐波时,这些干扰信号可能会通过电源线传导到连接在电网上的电子设备,影响其正常工作。

(三)电磁兼容设计原则

电磁兼容设计需以系统性思维贯穿设备研发全流程,核心是从干扰源、敏感设备及传播路径三个维度协同发力。首先聚焦干扰源抑制,选用低噪声元器件(如低辐射集成电路、软开关电源模块)降低固有干扰,优化电路拓扑以减少高频信号谐波、控制开关速度,从源头削减电磁发射。其次强化设备抗扰能力,通过屏蔽阻挡外部电磁波,配合滤波滤除传导干扰,结合软件抗扰算法(如数据校验、时序容错)提升耐受阈值。此外切断传播路径,合理布局实现干扰源与敏感电路隔离,规范布线减小环路面积,适配接地方式(低频单点、高频多点)避免耦合。三者结合可构建全方位防护体系,保障设备在复杂电磁环境中稳定工作。

二、电磁干扰源分析及分类

(一)按照干扰源的性质分类

电磁干扰源按性质可分为自然干扰源与人为干扰源。自然干扰源于自然界电磁现象,如雷电产生的强电磁脉冲,其瞬间能量可击穿设备绝缘;太阳耀斑释放的高能粒子流与电磁辐射,会干扰卫星通信和短波传输。人为干扰源则由人类活动产生,包括电力系统的谐波与电

作者简介: 李松(1989.08--),男,汉族,四川泸州人,本科学历,研究方向:电磁兼容。

压波动、通信设备的射频辐射、电子设备内部的开关噪声与时钟信号等。例如，工业电机启停引发的电网干扰，无线电台发射的杂散信号，以及数字电路高速切换产生的电磁辐射，均属此类。两类干扰源共同构成复杂电磁环境，对电子设备稳定性构成挑战^[2]。

（二）按照干扰源的工作状态分类

电磁干扰源按工作状态可分为连续波干扰源与脉冲干扰源。连续波干扰源产生持续稳定的电磁辐射，频率特性明确，如广播电台、电视台的载波信号，其干扰表现为对同频设备的持续性信号叠加，导致接收灵敏度下降或信号失真。脉冲干扰源则在短时间内释放高强度电磁能量，具有突发性与宽频谱特性，如雷达发射的脉冲信号、开关电源的瞬态切换噪声。这类干扰能量集中，易引发设备误触发、数据错误甚至硬件损伤，例如汽车点火系统产生的脉冲干扰可能导致周边电子设备短暂失灵。两种状态的干扰源在传播特性与危害形式上存在显著差异，需针对性采取抑制措施。

（三）按照干扰源的空间分布分类

电磁干扰源按空间分布可分为点源、线源和面源。点源指尺寸远小于工作波长的干扰源，如小型芯片、传感器等，其电磁辐射随距离增加呈平方反比衰减，在远处可近似为球面波传播，例如单片机振荡器产生的局部辐射。线源通常为长距离延伸的干扰载体，如输电线、电缆束等，其干扰以线为中心向周围扩散，场强随距离线性衰减，像高压输电线路产生的工频电磁辐射即属此类^[3]。面源则是尺寸远大于工作波长的平面状干扰体，如大型金属壳体、阵列天线等，其辐射具有平面波特性，覆盖范围广且场强分布相对均匀，例如雷达天线阵面的电磁辐射。不同空间分布的干扰源需结合其传播特性设计针对性防护方案。

三、电磁干扰传播路径研究

（一）电路系统中的电磁干扰传播

电路系统中，电磁干扰主要通过导线、印制电路板（PCB）走线及元器件间耦合传播。导线与PCB走线是传导干扰的主要通道，例如电源线可将电网噪声引入设备，而高频信号线的长距离布线会因阻抗不匹配产生辐射，形成干扰源。同时，电源线与信号线间存在电容性与电感性耦合，平行铺设时易发生信号串扰，如强电线路会通过电场耦合干扰邻近弱电信号。此外，元器件布局不当会加剧干扰传播，如将高频振荡器与敏感放大器近距离放置，或布线形成大电流环路，会通过空间辐射相互

干扰，降低系统稳定性。优化布线与布局可有效阻断这类传播路径。

（二）无线通信中的电磁干扰传播

无线通信中，电磁干扰通过空间电磁波传播，干扰机制复杂。发射端的杂散辐射会直接混入其他通信链路，如基站旁瓣信号可能干扰邻近频段设备。接收端易受同频或邻频干扰，导致有用信号被淹没，例如民用对讲机可能干扰航空通信。多径效应加剧干扰，反射波与直射波叠加形成衰落，使信号幅度剧烈波动，影响解调准确性。此外，宽带干扰源如电磁脉冲，可覆盖多个通信频段，造成区域性通信中断。无线信道的开放性使干扰传播无明确边界，需通过频率规划、跳频技术及抗干扰编码等手段抑制其影响^[4]。

（三）空间环境下的电磁干扰传播

空间环境中，电磁干扰传播受地球磁场、电离层及宇宙辐射影响显著。地球磁场会偏转带电粒子，使电磁信号传播路径弯曲，尤其低频信号易受磁场调制而失真。电离层对电磁波的反射与吸收具有频率依赖性，高频信号可经电离层反射实现远距离传播，但太阳活动引发的电离层扰动会导致信号衰减或中断。此外，宇宙射线与高能粒子撞击航天器，会产生瞬时电磁脉冲，干扰星载电子设备，如卫星传感器可能因单粒子效应出现数据错误。空间干扰源复杂且传播路径多变，需结合轨道特性与电磁环境模型优化抗干扰设计。

四、电磁兼容测试技术

（一）测试目的与意义

电磁兼容测试的主要目的是检验电子设备或系统是否符合相关的电磁兼容标准，确保其在预期的电磁环境中能够正常工作，同时不对其他设备或系统产生过度的电磁干扰。通过电磁兼容测试，可以发现设备在设计、生产过程中存在的电磁兼容问题，为改进产品设计、提高产品质量提供依据。电磁兼容测试对于保障电子设备的可靠性和安全性、促进国际贸易、维护电磁环境秩序具有重要意义。随着电子设备的日益普及和电磁环境的日益复杂，电磁兼容测试已成为电子产品研发、生产和市场准入过程中不可或缺的一环。

（二）测试场地

电磁兼容测试需在特定场地开展以保证数据有效性。开阔试验场（OATS）为平坦空旷区域，地面铺设导电层，可模拟真实电磁环境，适用于辐射发射与抗扰度测试，但易受天气和外部干扰影响。屏蔽室由金属材料

构建，能隔绝内外电磁信号，常用于传导测试及小尺寸设备的辐射测试，测试条件稳定但空间电磁环境与实际存在差异。电波暗室在屏蔽室内壁加装吸波材料，可吸收电磁波减少反射，模拟自由空间环境，分全电波暗室（六面吸波）和半电波暗室（地面导电），适用于高精度辐射测试，不过建设与维护成本较高。

（三）测试仪器

电磁兼容测试依赖多种专用仪器构建完整测量体系。频谱分析仪是核心设备，可解析不同频率的电磁信号强度，精准捕捉设备辐射或传导的干扰峰值。信号发生器用于模拟各类干扰信号，如正弦波、脉冲波等，配合功率放大器可产生满足抗扰度测试要求的高强度电磁激励。接收机与天线组合，负责接收空间辐射的电磁信号，天线类型需适配测试频段，如鞭状天线用于低频，喇叭天线用于微波段。人工电源网络（LISN）则在传导测试中隔离电网与被测设备，精准耦合电源线中的干扰信号，确保测试数据的准确性与重复性。这些仪器协同工作，实现对设备电磁兼容性能的全面评估^[5]。

（四）测试项目与方法

电磁兼容测试主要包括电磁发射与电磁抗扰度两大类项目。电磁发射测试旨在评估设备自身产生的干扰强度，分为辐射发射和传导发射测试。辐射发射测试中，被测设备置于标准测试场地，通过定向天线接收其辐射的电磁波，由频谱分析仪记录不同频率的信号强度，与标准限值比对；传导发射测试则利用人工电源网络，采集设备通过电源线或信号线传导的干扰信号，测量其电压或电流值。

电磁抗扰度测试用于验证设备抵御外部干扰的能力，同样包含辐射抗扰度和传导抗扰度测试。辐射抗扰度测试通过天线向设备发射特定频率和强度的干扰信号，观察设备是否出现性能下降或故障；传导抗扰度测试则通过耦合装置将干扰信号注入设备的电源或信号端口，评估其在干扰环境下的工作稳定性。测试过程需严格遵循标准规定的布置方式、信号参数及判据，确保结果的客观性与可比性。

（五）测试标准

电磁兼容测试标准是进行电磁兼容测试的依据，不同国家和地区都制定了相应的电磁兼容标准。国际上常用的电磁兼容标准包括国际电工委员会（IEC）制定的IEC 61000系列标准、欧洲的EN系列标准等。我国也制定了一系列电磁兼容国家标准（GB），如GB/T 9254.1-2021《信息技术设备、多媒体设备和接收机 电磁兼容 第1部分：发射要求》、GB/T 17626《电磁兼容 试验和测量技术》等。这些标准对电磁兼容测试的场地、仪器、方法、限值等都做出了详细规定，确保了测试结果的一致性和可比性。在进行电磁兼容测试时，应根据被测设备的类型、用途和销售地区等因素，选择合适的测试标准。

结论

电磁兼容设计与测试技术是电子设备稳定运行的核心保障。本文系统梳理了电磁干扰的来源、传播路径，阐述了屏蔽、滤波、接地等设计策略及测试技术要点。实践表明，通过科学的设计手段可从源头抑制干扰，规范的测试能有效验证设备兼容性。随着电子设备高频化、集成化发展，电磁环境更趋复杂，需持续深化基础理论研究，创新设计方法与测试技术，完善标准体系。这对提升产品可靠性、推动产业升级及保障公共电磁环境安全具有重要意义。

参考文献

- [1] 汤丹, 李杰, 胡陈君, 等. 高速数据记录仪的电磁兼容设计[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(07): 143-146.
- [2] 梁文林, 井占发. 电磁兼容技术在某车载配电设备中的设计应用[J]. 机电元件, 2025, 45(03): 29-33.
- [3] 常君, 叶丹, 王寅冬, 等. 汽车电子PCB板级电磁兼容设计[J]. 汽车电器, 2025, (05): 73-74+78.
- [4] 霍亚飞. 新能源汽车电驱系统电磁兼容设计优化方法研究[J]. 上海汽车, 2025, (05): 14-17.
- [5] 杜浪东, 荆攀, 赵天玉, 等. 浅谈汽车零部件电磁兼容设计方法[J]. 汽车电器, 2025, (04): 40-41+45.