

电磁干扰及电磁兼容检测

章 震 杨 涛

航科质测(西安)科技有限公司 陕西 西安 710117

摘要: 电磁干扰(EMI)是制约电子设备可靠性的关键因素,电磁兼容(EMC)检测则是验证设备电磁兼容性、保障产品合规上市的核心手段。本文系统阐述电磁干扰的产生机理与传播方式,深入分析电磁兼容检测的理论基础、标准体系与测试方法。从传导发射测试、辐射发射测试、抗扰度测试三大核心测试项目出发,详细解析测试原理、设备配置、场地要求及操作要点,并探讨预测试与全兼容测试的策略选择。研究表明,系统化的EMC检测体系需将标准理解、场地校准、测试程序与问题诊断有机结合。本文旨在为电磁兼容检测工程师提供系统化的技术参考与实操指导。

关键词: 电磁干扰;电磁兼容检测;传导发射;辐射发射;抗扰度测试

引言: 电磁干扰(EMI)是指电子设备在工作过程中产生的无用电磁能量,这种能量通过传导或辐射方式传播,可能对其他设备的正常运行造成不利影响。随着电子设备集成度不断提高、工作频率持续攀升,电磁环境日益复杂,电磁兼容性问题已成为产品设计与认证中的核心挑战。电磁兼容检测作为验证产品电磁兼容性能、确保符合法规要求的关键环节,贯穿产品研发、认证、生产全过程。本文从电磁干扰机理出发,系统阐述电磁兼容检测的理论基础、测试方法与应用实践,为检测工程师提供系统化技术参考。

1 电磁干扰基础理论与传播机理

1.1 电磁干扰的定义与分类

电磁干扰是指电磁能量通过传导或辐射方式传播,对电子设备、系统或生物体产生的不利影响。根据干扰来源分为自然干扰(雷电、静电、太阳黑子活动)和人为干扰(开关电源瞬态、时钟谐波、电机火花)。根据传播路径分为传导干扰(沿电源线、信号线传播,频率150kHz~30MHz)和辐射干扰(通过空间电磁场传播,频率30MHz~18GHz)。根据频谱特性分为窄带干扰(时钟谐波)和宽带干扰(开关电源噪声)。理解电磁干扰的分类有助于针对性选择检测方法和抑制措施。

1.2 电磁干扰的三要素模型

电磁干扰的发生必须具备三个基本要素:干扰源、耦合路径和敏感设备。干扰源包括数字时钟谐波、开关电源瞬态、电机电弧、无线射频发射等。耦合路径分传导耦合(共阻抗耦合、电容性耦合、电感性耦合)和辐射耦合(电磁波空间辐射)。敏感设备的易受干扰程度取决于其抗扰度水平。解决电磁干扰问题的核心策略是消除三要素中的任意一个:抑制干扰源、切断耦合路径

或提高敏感设备的抗扰度^[1]。

1.3 传导干扰与辐射干扰的机理

传导干扰沿导体传播,分差模和共模两种模式:差模干扰电流在信号线与回流线之间方向相反;共模干扰电流在多条导体上方向相同,以大地或机壳为回流路径,共模辐射效率远高于差模。传导干扰频率范围通常为150kHz~30MHz。辐射干扰通过空间电磁场传播,当电流环路尺寸接近信号波长四分之一时成为高效辐射天线。近场以电场或磁场为主且快速衰减,远场以平面波传播,场强与距离成反比。理解传导与辐射干扰机理是设计有效检测方案的基础。

2 电磁兼容检测标准体系

2.1 国内外EMC标准体系概述

EMC检测依据国际标准和各国强制法规进行,产品上市前必须通过相应认证。国际层面,CISPR负责制定无线电干扰限值和测量方法标准,包括CISPR 11(工科医疗设备)、CISPR 22/32(信息技术设备)、CISPR 25(车载设备)等。IEC 61000系列是EMC测试的核心标准,涵盖电磁环境描述、限值要求和试验技术。欧洲采用CE认证,遵循EMC指令2014/30/EU;美国采用FCC认证,FCC Part 15/18规定辐射限值;中国采用CCC认证,对应GB/T 9254、GB 4824、GB/T 17626系列标准。了解标准差异对产品出口认证至关重要。

2.2 发射测试标准与限值

发射测试分传导发射和辐射发射两类。传导发射测试测量电源端口干扰电压,频率150kHz~30MHz,采用LISN提供稳定阻抗并耦合干扰信号,限值分准峰值和平均值。辐射发射测试测量空间辐射场强,频率30MHz~18GHz(1GHz以上设备需扩展至40GHz),在

半电波暗室或开阔场中进行,测试距离3米、10米或30米。CISPR 32规定Class A(工业环境)和Class B(家用环境)限值,后者严格约10dB。正确选择标准等级是产品合规设计的前提^[2]。

2.3 抗扰度测试标准与方法

抗扰度测试验证设备在外部干扰中能否正常工作。主要项目包括:静电放电(ESD)依据IEC 61000-4-2,接触放电 $\pm 4/\pm 6$ kV、空气放电 $\pm 8/\pm 15$ kV;电快速瞬变脉冲群(EFT)依据IEC 61000-4-4,测试电压 $\pm 1/\pm 2$ kV;浪涌(Surge)依据IEC 61000-4-5,测试电压可达 ± 4 kV;辐射抗扰度依据IEC 61000-4-3,场强3V/m、10V/m或更高;传导抗扰度依据IEC 61000-4-6,频率150kHz~80MHz。测试等级根据应用环境确定,医疗、工业设备要求通常高于消费电子产品。

3 电磁兼容检测核心测试项目

3.1 传导发射测试

传导发射测试用于测量设备电源端口向电网注入的干扰电压。测试系统由线路阻抗稳定网络(LISN)、EMI接收机和人工手模拟网络组成。LISN是核心设备,每个电源线配置一个,内部包含50 μ H电感与50 Ω 电阻的并联网络,提供稳定阻抗,同时隔离电网噪声并耦合干扰信号至接收机。EMI接收机具备准峰值、平均值等多种检波方式,可分段扫描测量各频率点干扰电平。被测设备放置在接地参考平面上,与LISN距离不超过0.8米,扫描频率150kHz~30MHz。传导发射超标常见原因包括:电源滤波器设计不当、接地不良、Y电容选取不合适、PCB布局导致共模干扰等。排查时可采用电流探头沿电源线扫描,判断干扰以差模还是共模为主,再针对性优化滤波电路。

3.2 辐射发射测试

辐射发射测试测量设备空间辐射的电磁场强,在半电波暗室中进行,暗室墙壁覆盖吸波材料消除反射。测试系统包括EMI接收机、天线、天线塔、转台及控制单元。频率范围30MHz~18GHz,分段采用不同天线:30~300MHz用双锥天线,300MHz~1GHz用对数周期天线,1GHz以上用喇叭天线。测试距离3米或10米,被测设备置于转台,天线在1~4米升降,转台0~360度旋转,测量各方向最大辐射电平。结果受场地特性、天线系数、电缆损耗影响,需系统校准。超标常见原因:高速时钟辐射、地平面不连续、电缆充当天线、机箱屏蔽不严。定位可采用近场探头沿PCB、线缆和缝隙扫描,结合频谱分析仪找出最强辐射点。

3.3 静电放电抗扰度测试

静电放电(ESD)抗扰度测试模拟人体或物体带电后接触设备产生的放电,依据IEC 61000-4-2标准。ESD模拟器内置150pF充电电容和330 Ω 放电电阻,产生上升时间约1ns的陡峭电流脉冲。测试分接触放电(适用于金属表面)和空气放电(适用于绝缘表面)。消费电子产品要求接触放电 ± 4 kV、空气放电 ± 8 kV,工业及医疗设备要求更^[3]。测试点包括操作人员可接触的所有金属部件、缝隙、按键、指示灯等,每点至少10次正负极性放电。设备可能出现复位重启、死机、显示闪烁等异常。整改措施包括:增加ESD保护器件、优化接地设计减少回路电感、敏感信号线加滤波电路、机箱接缝加导电衬垫。

3.4 电快速瞬变脉冲群与浪涌抗扰度测试

电快速瞬变脉冲群(EFT)模拟感性负载切换(如继电器、接触器)时产生的瞬态脉冲群。测试依据IEC 61000-4-4标准,EFT发生器产生脉冲重复频率为5kHz或100kHz的脉冲群,每个脉冲持续15ms,脉冲群周期300ms。单个脉冲上升时间5ns,脉宽50ns,电压可达 ± 2 kV或更高。EFT干扰通过耦合夹注入电源线和信号线,测试时需分别对L、N、PE及各信号端口施加干扰。EFT干扰能量虽不大,但上升时间极快,频谱分布宽,易通过寄生电容耦合至敏感电路。常见故障现象包括:微控制器复位、通信误码、显示异常等。

浪涌(Surge)抗扰度测试模拟雷击或大功率设备切换产生的过电压浪涌。测试依据IEC 61000-4-5标准,浪涌发生器产生1.2/50 μ s开路电压波和8/20 μ s短路电流波,电压等级可达 ± 4 kV、 ± 6 kV甚至更高。浪涌测试需在线路中配置耦合去耦网络,将浪涌注入电源线和信号线。差模浪涌施加于L-N之间,共模浪涌施加于L/N-PE之间。浪涌能量大,可直接损坏器件,测试时需确保被测设备的安全。浪涌防护主要依靠压敏电阻、气体放电管、瞬态电压抑制器等防护器件,配合适当的前端滤波电路。两种测试都需根据产品使用环境选择相应测试等级,并评估测试过程中的性能判据(Class A/B/C/D)。

4 EMC检测场地、设备与预测试策略

4.1 EMC检测场地要求

EMC检测对场地环境有严格的要求,以保证测试结果的可重复性和可比性。半电波暗室是辐射发射测试的标准场地,其地面为金属反射面,墙壁和天花板覆盖吸波材料,模拟开阔场的电磁环境。暗室的屏蔽效能要求不低于100dB,背景噪声应比标准限值低6dB以上。吸波材料通常采用聚氨酯泡沫浸渍碳,锥形结构实现阻抗渐变,减少电磁波反射。暗室尺寸根据测试距离和被测设备最大尺寸确定,标准3米法暗室尺寸约为9m $\times$ 6m $\times$ 6m,

10米法暗室尺寸则超过20m×15m×9m。传导发射测试在屏蔽室内进行,屏蔽室不需要吸波材料,但需保证电源线的射频滤波和接地系统的低阻抗。开阔场作为参考测试场地,需远离建筑物和电力线,场地平坦导电,但目前已被电波暗室逐步取代。测试场地需定期按照CISPR16-1-4要求进行场地衰减校准,确认场地性能符合标准要求。

4.2 EMC检测核心设备

EMC检测的核心设备包括EMI接收机、频谱分析仪、线路阻抗稳定网络、天线及各类注入探头。EMI接收机是发射测试的核心设备,其特点是具有准峰值检波功能,能够模拟人耳对干扰的主观听觉响应,同时具备多种分辨率带宽设置。EMI接收机需按照CISPR16-1-1的要求定期校准。频谱分析仪可用于预测测试和干扰定位,其扫描速度快、成本较低,但不具备准峰值检波功能,测试结果需进行修正。线路阻抗稳定网络(LISN)用于传导发射测试,不同标准对LISN的阻抗特性有明确规定,使用前需检查LISN的隔离度和分压系数。辐射发射测试使用的天线包括:双锥天线(30~300MHz)、对数周期天线(300MHz~1GHz)、复合天线(30MHz~1GHz)、喇叭天线(1GHz以上)。天线系数是校准天线性能的关键参数。抗扰度测试设备包括:ESD模拟器、EFT/浪涌发生器、射频信号发生器及功率放大器、GTEM小室或横电磁波室等,这些设备需按照各自标准定期校准以保证测试结果的准确性。

4.3 预测测试与全兼容测试策略

EMC测试可分为预测测试和全兼容测试两个层次。预测测试在产品研发阶段进行,目标是尽早发现问题、降低后期认证失败风险。预测测试可在企业内部搭建简易测试环境:传导发射预测测试可采用频谱分析仪加LISN的方案,配置适当的限值线;辐射发射预测测试可在实验室内采用近场探头扫描,定位干扰源位置和频率。预测测试的

优势在于成本低、灵活快捷,能指导研发人员快速定位并解决问题。全兼容测试在具备资质的第三方实验室进行,测试结果具有法律效力,是产品获取认证的依据。全兼容测试要求场地、设备、人员均符合标准规定,测试报告需包含详细的测试配置、测试数据及环境条件记录^[4]。产品在提交全兼容测试前,建议先进行充分的预测测试,确保各项指标留有足够裕量(通常建议3~6dB),以应对场地和设备差异带来的不确定度。对于产品系列,可采用“最大组合”策略,选择最具代表性的型号进行全兼容测试,其他型号通过技术分析进行覆盖。

结束语

电磁干扰及电磁兼容检测是保障电子设备可靠运行、确保产品合规上市的关键技术环节。本文系统阐述了电磁干扰的产生机理与传播方式,全面介绍了EMC检测的标准体系、核心测试项目、场地设备要求及测试策略。随着电子技术向高频化、智能化方向发展,EMC检测面临新的挑战:5G通信、物联网、汽车电子等新兴领域的检测要求更为复杂,测试频率不断扩展,测试方法持续演进。检测工程师应深入理解干扰机理,熟练掌握测试方法,将标准要求与工程实践紧密结合,在保障产品质量的同时,推动电磁兼容技术的持续创新与发展。

参考文献

- [1]陈朋刚,杨成乐,刘斌,等.场效应治疗仪电磁兼容检测方法研究[J].中国医疗器械信息,2025,31(1):50-52,102.
- [2]周玉梅.电子产品电磁兼容检测标准中的关键技术[J].大众标准化,2026(3):13-15.
- [3]安海龙,王俊青,刘宝殿,等.信息技术设备电磁兼容性检测及整改优化策略分析[J].轻工标准与质量,2024(5):99-102.
- [4]赖贵陵.低压电器产品电磁兼容检测技术研究[J].消费电子,2025(21):80-82.