

# 电磁兼容试验技术在复杂电子系统中的应用研究

王成林

无锡中科睿通检测技术有限公司 江苏无锡 214000

**摘要：**在现代工业、军事和医学等众多领域中，复杂电子系统得到了越来越多的应用。但是，在复杂的电磁环境下，各电子系统间的电磁兼容问题日益突出，已成为影响其工作效率与安全性的的重要因素。电磁兼容试验技术是评估和优化电子系统电磁兼容性的一种有效方法，其研究和应用显得尤为重要。在此背景下，本文概述了复杂电子系统的电磁兼容特性，思考了电磁兼容试验技术体系与方法，探究了复杂电子系统中电磁兼容试验技术的应用场景，并对具体应用案例进行了分析，旨在为相关技术人员提供书面参考与借鉴，助力电磁兼容技术发展。

**关键词：**复杂电子系统；电磁兼容；试验技术

根据《2023年中国电磁兼容测试行业市场报告》，2022年中国电磁兼容测试市场规模达到人民币158亿元，较上一年相比增长了16.7%。现代科学技术的快速发展，使得复杂电子系统具有越来越高的集成度和功能复杂性，同时也带来了更高的电磁兼容性（EMC）需求。电磁干扰（EMI）不但会降低系统性能，而且还会引起重大的安全事件。因此，在整个产品研发的过程中，电磁兼容试验技术是不可或缺的重要环节，直接关系到整个系统的可靠性。为了保证复杂电子系统能够在恶劣的电磁条件下稳定运行，应深入研究并应用电磁兼容试验技术，模拟实际运行中的电磁干扰情况，及时发现并解决潜在的电磁兼容问题，提高整个系统的综合性能，确保系统在各种环境下均能高效运行，满足严格的质量与安全标准。

## 一、复杂电子系统的电磁兼容特性

从干扰源角度看，内部干扰来源于高速芯片、功率器件等部件运行过程中所引起的电磁噪声，而外部干扰包括自然电磁干扰（如雷电）和人为干扰（如通信基站信号）。这些干扰通过传导耦合（电源线、信号线）与辐射耦合（近场感应、远场辐射）两种核心机制，在系统内相互作用。以航电电子系统为例，由于飞机内部布置了众多的电子设备，且要面对的是高海拔环境下的电磁辐射和发动机的电磁噪声，各组件之间的相互影响非常明显，容易引起信号串音和性能失调<sup>[1]</sup>。另外，在恶劣工作条件下，温度和振动等物理环境也会增加电磁干扰的不确定度，从而给系统的电磁兼容设计和试验带来更大困难。上述特性成为制约复杂电子系统性能提升的关键因素，需要进行系统测试和优化。

## 二、电磁兼容试验技术体系与方法

### （一）基础试验技术分类

电磁兼容基础试验技术主要分为两类，分别是电磁发射试验与电磁抗扰度试验。电磁发射试验主要是对由该电子装置本身发出或传递的电磁能进行测试，以避免对其他装置造成影响。传导发射（CE）试验，通过对导线（如电源线和信号线）上的扰动信号进行检测，以判定该装置满足要求；辐射发射试验是指通过微波暗室和天线等装置对装置产生的电磁波进行采集，以保证其在特定频带范围的辐射不会超过标准。电磁抗扰度试验是为了检验电子系统在外部EMI下的工作可靠性。传导抗扰度（CS）试验通过将扰动信号输入到导线中，模拟电网中的谐波和静电放电等导电扰动，来探测系统的工作状态；辐射抗扰度（RS）试验是利用天线将各种电磁信号辐射到系统中，仿真移动通信基站和雷达等电磁干扰源，对其进行抗干扰性能评价。

### （二）先进试验技术手段

先进电磁兼容试验技术是为了克服常规检测方法的限制，提高检测的准确性和高效性。近场扫描技术是一种基于毫米波探测器和磁场阵列成像装置的新型电磁探测装置，可以实现电磁环境中的高精度探测，精确地确定扰动来源，指导电磁环境的最优设计。瞬态干扰测试则针对静电放电（ESD）、电快速瞬变（EFT）、浪涌（Surge）等短时高强度干扰，利用特殊的电源产生装置，模拟恶劣的电磁环境，进行暂态扰动试验，研究其在瞬时脉冲作用下的工作特性。多参数联合测试技术通过搭建电磁-温度-振动复合环境试验平台，实现对复杂工作

条件下的多物理场耦合作用下的电磁兼容性能分析。同时,利用一体化的器件和算法,自动产生扰动信息,进行数据采集和处理,极大提高了试验的速度和精度,在大规模生产检测中有着明显的优势<sup>[2]</sup>。

### (三) 仿真与测试融合技术

仿真与测试融合技术通过将系统级电磁仿真工具(如CST、HFSS、FEKO)和物理测试相结合,对复杂电子设备的电磁兼容性进行综合评价。在设计前期,借助计算机模拟技术对系统结构、PCB布局、天线等进行建模与分析,对可能出现的EMI问题进行预测,从而为设计方案的优化提供依据,降低实物样机的迭代代价。在实物试验中,通过与实验测量的比较,对所建立的数学模型进行改进,以提高模拟的准确性。虚拟仿真与物理测试的协同,还体现在虚拟试验场景构建上,通过仿真模拟难以在实验室复现的极端电磁环境,为物理测试提供补充。进一步,利用数字孪生技术,建立面向全寿命周期的仿真模型,对多工作状态下的EMC性能进行实时监控和预测,促进EMC测试由事后验证向事前预测和主动优化转变。

## 三、复杂电子系统中电磁兼容试验技术的应用场景

### (一) 航空航天领域

在航空航天领域,由导航、通信、控制、遥感等多种高精度装备组成的复合电子系统,其电磁兼容特性对飞行安全和任务成败有着重要的影响。以民航客机为例,飞机上安装了上千个雷达、卫星通信天线、自动驾驶仪等电子模块,还要抵抗宇宙射线、太阳风暴等自然电磁干扰,以及地面基站和其他飞行器的人为干扰。所以,电磁兼容试验贯穿于航空航天产品的全生命周期。在研制过程中,利用CST、FEKO等软件,通过对飞机总体布局、天线布置和电缆方向的仿真,预测潜在干扰问题;采用近场探测方法,实现对机载电子装备的高频率电磁泄漏位置的精密检测。在产品认证方面,按照DO-160G等国际规范,对航空装备进行严格的电磁辐射和抗干扰性能实验,如针对航空装备,通过对其进行雷电冲击防护实验,模拟飞机遭雷击时设备的承受能力。采用高强度辐射场法(HIRF)测试,验证系统在强磁场作用下的功能性完好性。此外,对于卫星载荷,也需要开展真空、高低温环境下的EMC试验,以保证其能够在空间恶劣环境中长期稳定工作<sup>[3]</sup>。

### (二) 轨道交通领域

由牵引供电、列车控制、通信信号和旅客信息等多

种电子系统构成的轨道交通系统,其运营条件十分复杂,电磁兼容问题尤为突出。以高铁为例,由于牵引换流器在运行过程中会引起电力线和铁路沿线的通信基站、电气化铁道接触网等电磁环境的影响,对列车信号系统形成辐射干扰。所以,电磁兼容试验是保障行车安全的关键环节。在列车的研制过程中,采用计算机模拟的方法,建立牵引换流器和信号电缆的模型,并对其进行优化;通过传导发射试验方法,检测列车供电装置的电磁辐射强度,以确定其满足EN55022等相关规范。在抗扰度实验中,对行车控制系统开展电快速瞬变脉冲群(EFT)测试,模拟运行过程中的暂态扰动;进行浪涌抗扰度实验,以检验其对雷电、电力网络等失效情况的稳定性。针对车地通信系统,需要在电波暗室中模拟多种无线频段干扰,验证车-地之间的通信可靠性,消除由于EMI造成的数据缺失或误判,保证列车安全和准点率。

### (三) 医疗电子领域

医疗电子设备与患者生命安全密切相关,其电磁兼容性不但要保证仪器本身的正常工作,而且还要保证不会影响其他医疗设备和人体安全。例如,磁共振(MRI)的高强度磁场和RF脉冲容易对周围的电子装置造成影响,而仪器本身又需要抗外界的电磁干扰,保证图像的品质。所以,对医用仪器进行EMC测试时,必须同时考虑到安全和功能两个方面。在设备研制过程中,按照YY 0505等国产医用电磁兼容性规范,对心脏起搏器、监护仪等设备进行严密的电磁发射试验,控制其所发出的电磁辐射,避免对其周围的医用设备造成影响。在抗扰度试验中,通过对医疗器械进行静电释放实验,以模拟医疗机构工作时所引起的静电干扰;通过射频电磁场辐射抗扰度测试,验证设备在无线信号和手机信号等环境下的工作性能。结合外科手术室等高灵敏的工作场景,开展系统级别的EMC检测,保证多个仪器在工作时不会互相影响,比如检测无影灯和手术机器人的电磁兼容性,防止由于外界因素造成的操作失误,保证医学操作的准确性和安全性<sup>[4]</sup>。

### (四) 工业控制领域

工业控制领域涉及智能制造、电力系统、自动化生产线等诸多应用场合,其电子系统受到强电磁噪声、电网波动和机械振动等多种因素的影响。以智能工厂为例,大量的传感器、可编程逻辑控制器(PLC)和工业机器人一起工作,而在这个过程中,变频器、电焊机等设备也会产生高频的EMI,如果不进行有效的控制,将

会造成生产数据的错误和设备的停机。在产品研制过程中，采用计算机模拟技术建立了自动流水线的电磁环境模型，优化设备布局与线缆铺设，减少干扰耦合。采用导电-辐射试验方法，对仪器的功率端口进行谐波测量，以保证其满足GB/T17626等相关规范要求。在抗扰度试验中，以PLC为主要控制单元，模拟变电所等高磁场的工作环境；开展电压暂降和短期停电试验，检验电力系统在发生事故情况下的连续工作性能。针对物联网传感器网络，需要进行无线通信兼容性测试，以防止因多波段信息碰撞而造成的干扰，提高工业控制系统的可靠性，减少由于EMI造成的安全隐患，保证工业生产的连续性、高效性<sup>[5]</sup>。

#### 四、具体应用案例分析

在智能网联汽车这一复杂电子系统中，为了保证通信设备在复杂的电磁干扰条件下能够工作，确保驾驶员的人身安全，必须进行严密的电磁兼容试验。在前期工作中，项目组利用专用的电波暗室和EMC测试系统，模拟真实的电磁环境与干扰源，并通过V2X测试系统验证车辆的V2X性能，结合滤波器、放大器等硬件搭建试验平台。在建立测试平台时，按照规范布局，将V2X PC5消息接收综测仪和GNSS模拟器接入相应的天线端口，保证天线的选择和布局合理，保障信号的平稳传送。在测试实现方面，基于CANoe构建多个试验情景，通过GNSS模拟器仿真主车位置，根据相关标准构建并发送消息体，并与被测车辆进行通信以启动V2X功能，通过vTEST studio编程完成自动检测。然后，利用EMI发射器对车载V2X通信系统进行不同强度和频率的干扰试验，测试系统的抗干扰能力。结果验证时，CANoe会收集车辆的报警信息，并将其与非干扰的情况进行比较，从而判定是否存在EMC问题，还可以通过暗室摄像头来查看车机V2X的预警功能和导航系统的状态。最终，通过一系列电磁兼容试验，为智能网联汽车在复杂电磁干扰条件下的通信稳定性和驾驶安全性提供科学依据。（如表）。

表 关键信息总结

测试环节	具体操作	测试结果
设备准备	启用电波暗室、EMC测试系统，准备V2X测试系统及配件	构建良好测试环境
环境搭建	按标准连接设备，合理选型、布置天线	信号稳定传输
测试实现	在CANoe搭建场景、发送消息体，借助工具实现自动化测试	成功触发V2X功能
干扰施加	用EMI发射器施加干扰	检测抗干扰能力
结果验证	CANoe采集信号、摄像头观察车机状况	判断电磁兼容性

#### 结语

综上所述，在复杂电子系统中应用电磁兼容试验技术，对提高设备的工作效率和安全性具有重要意义，也是推动科技进步与产业升级的关键。在未来的科技发展过程中，需要持续优化电磁兼容性的研究与实践，扩大其使用范围，提高检测的准确性和有效性，为构建更加可靠、高效的电子系统打下良好的基础。

#### 参考文献

- [1]周鹏飞,张辉,傅勇,杨正炜.基于某系统设备的电磁兼容试验分析[J].环境技术,2025,43(02):25-29.
- [2]魏晓辰,王昭华,肖智铎.电驱系统电磁兼容轴电流优化及试验方法研究[J].安全与电磁兼容,2024,(04):84-88.
- [3]罗迅,李晓智,黄雪梅.燃料电池系统的电磁兼容试验研究[J].环境技术,2024,42(05):176-181.
- [4]林巧,曾霞,鲁毅,程娟.汽车电子助力转向系统电磁兼容试验方法分析[J].汽车电器,2024,(02):88-89+92.
- [5]朱明健,刘萌,杨姝,李庆雨,刘梦梦,李得禹.车载医用电气设备电磁兼容的检测方法[J].医疗装备,2022,35(05):40-44.