

电磁兼容（EMC）核心要素与应用概述

张静静 胡国良 汤 斌

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100095

摘 要：随着电子设备的广泛应用和无线通信技术的飞速发展，电磁环境日益复杂，电磁兼容问题已成为影响电子设备性能与安全的关键因素。本文系统阐述了电磁兼容的基本概念、核心标准、关键技术手段及其在工业、通信、医疗等领域的应用，并分析了当前面临的技术挑战与未来发展趋势，为电磁兼容设计与测试提供理论参考。

关键词：电磁兼容；电磁干扰；EMC设计；EMC测试；标准；滤波；屏蔽

1 引言

电磁兼容（EMC）是指设备或系统在其电磁环境中符合要求运行并不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁干扰的能力。因此，EMC包括两个方面的要求：一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰不能超过一定的限值；另一方面是指设备对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰度，即电磁敏感性。

电磁兼容的研究是随着电子技术逐步向高频、高速、高精度、高可靠性、高灵敏度、高密度（小型化、大规模集成化），大功率、小信号运用、复杂化等方面的需要而逐步发展的。特别是在人造地球卫星、导弹、计算机、通信设备和潜艇中大量采用现代电子技术后，使电磁兼容问题更加突出。

从地球表面到人造卫星活动的空间内处处存在着电磁波，电和磁无时无刻不在影响着人们的生活及生产，电磁能的广泛应用，使工业技术的发展日新月异。电磁能在为人类创造巨大财富的同时，也带来一定的危害，被称为电磁污染，研究电磁污染是环境保护中的重要分支。以往人们把无线电通讯装置受到的干扰，称为电磁干扰，表明装置受到外部干扰侵入的危害，其实它本身也对外部其他装置造成危害，即成为干扰源。因此必须同时研究装置的干扰和被干扰，对装置内部的组织和装置之间要注意其相容性。随着科学技术的发展，日益广泛采用的微电子技术和电气化的逐步实现，形成了复杂的电磁环境。^[1]不断研究和解决电磁环境中设备之间以及系统间相互关系的问题，促进了电磁兼容技术的迅速发展。

2 电磁兼容的核心要素

电磁兼容的三要素是指骚扰源（如开关电源、数字电路）、耦合路径（传导耦合、辐射耦合）和敏感设备（如传感器、通信模块），三者相互作用构成电磁干扰

问题的核心。

2.1 骚扰源

任何形式的自然或电能装置所发射的电磁能量，能使共享同一环境的人或其它生物受到伤害，或使其它设备、分系统或系统发生电磁危害，导致性能降级或失效，即称为电磁骚扰源。一般说来电磁干扰源分为自然干扰源与人为干扰源两大类。

2.1.1 自然干扰源

主要来源于大气层的天电噪声、地球外层空间的宇宙噪声。他们既是地球电磁环境的基本要素组成部分，同时又是对无线电通讯和空间技术造成干扰的干扰源。自然噪声会对人造卫星和宇宙飞船的运行产生干扰，也会对弹道导弹运载火箭的发射产生干扰。

2.1.2 人为干扰源

是有机电或其他人工装置产生电磁能量干扰，其中一部分是专门用来发射电磁能量的装置，如广播、电视、通信、雷达和导航等无线电设备，称为有意发射干扰源。^[2]另一部分是在完成自身功能的同时附带产生电磁能量的发射，如机动车辆、架空输电线、照明器具、电动机械、家用电器以及工业、医用射频设备等等。因此这部分又成为无意发射干扰源。

2.2 耦合途径

耦合途径是传输骚扰的通路或媒介。电磁干扰传播途径一般也分为两种：即传导耦合方式和辐射耦合方式。

任何电磁干扰的发生都必然存在干扰能量的传输和传输途径（或传输通道）。通常认为电磁干扰传输有两种方式：一种是传导传输方式；另一种是辐射传输方式。因此从被干扰的敏感器来看，干扰耦合可分为传导耦合和辐射耦合两大类。

2.2.1 传导耦合

传导传输必须在干扰源和敏感器之间有完整的电路

连接, 干扰信号沿着这个连接电路传递到敏感器, 发生干扰现象。这个传输电路可包括导线, 设备的导电构件、供电电源、公共阻抗、接地平板、电阻、电感、电容和互感元件等。

2.2.2 辐射耦合

辐射传输是通过介质以电磁波的形式传播, 干扰能量按电磁场的规律向周围空间发射。常见的辐射耦合由三种: 1. 甲天线发射的电磁波被乙天线意外接受, 称为天线对天线耦合; 2. 空间电磁场经导线感应而耦合, 称为场对线的耦合; 3. 两根平行导线之间的高频信号感应, 称为线对线的感应耦合。

在实际工程中, 两个设备之间发生干扰通常包含着许多种途径的耦合。正因为多种途径的耦合同时存在, 反复交叉耦合, 共同产生干扰, 才使电磁干扰变得难以控制。

2.3 敏感设备

敏感设备是指当受到电磁骚扰源所发出的电磁能量的作用时, 会受到伤害的人或其它生物, 以及会发生电磁危害, 导致性能降级或失效的器件、设备、分系统或系统。许多器件、设备、分系统或系统既是电磁骚扰源又是敏感设备。^[3]敏感设备是对干扰对象总称, 它可以是一个很小的元件或一个电路板组件, 也可以是一个单独的用电设备甚至可以是一个大型系统。

3 电磁兼容在重点领域的应用

3.1 航空航天与国防

在飞机(民航、军用)、航天器(卫星、火箭、空间站)、雷达系统、通信系统、导航系统、武器制导系统、军用车辆/舰船电子设备等, 电磁干扰可能导致关键系统(如飞控、导航、发动机控制)失效, 引发灾难性事故。电磁兼容是飞行安全的核心保障之一。狭小空间内密集安装大量高功率(雷达、通信发射机)和高灵敏度(GPS接收机、传感器)设备, EMC设计是确保它们共存互不干扰的基础。需抵抗雷电、高强度辐射场等极端外部电磁威胁, 确保军用通信、雷达等不相互干扰, 也不干扰民用系统。

3.2 汽车行业

随着汽车行业向电动化和智能化的快速发展, 电磁兼容性(EMC)成为了设计和测试中的核心问题。汽车中电子设备数量的增加, 尤其是新能源汽车的电驱动系统, 现代汽车(尤其是电动汽车、智能网联汽车、自动驾驶汽车)包含数百个ECU、电机驱动系统、高压电池包、车载信息娱乐系统、ADAS传感器(雷达、摄像头、激光雷达)、无线通信模块

(V2X, Bluetooth, WiFi, Cellular), 因其高功率和高频开关器件的使用, 干扰可能导致刹车系统(ABS/ESC)、安全气囊、转向助力、电池管理系统等关键安全系统误动作或失效, 成为了EMC问题的主要源头。IEC61000系列标准为汽车电子设备的抗干扰能力提供了系统的测试方法, 包括辐射抗扰度、传导抗扰度、静电放电、浪涌和电快速瞬变/脉冲群测试, 以确保汽车电子设备在复杂电磁环境下的稳定性和可靠性。

在汽车行业中, 电磁兼容性不仅关乎车辆内部电子设备的正常运行, 也涉及到车辆与外部环境的电磁相互作用。国内汽车制造商为满足国家公告管理需求, 整车必须遵循GB14023-2011标准, 而自2021年起, 所有车型产品都需符合更为严格的GB34660-2017标准。

新能源汽车的电驱动系统, 作为汽车中的关键零部件, 其高功率和高频开关器件的使用, 使其成为EMC问题的主要来源。^[4]需要确保发动机控制、变速器控制等动力系统稳定运行。车辆自身是强骚扰源(点火系统、电机驱动器、DC-DC变换器), 同时面临外部骚扰(广播电台、手机基站、其他车辆)。车内设备密集, 线束复杂, 耦合路径多。

为应对这一挑战, 全球市场准入(如CISPR12/25, ISO11452, ISO7637系列标准)的强制性要求, 2018年发布的GB/T36282-2018标准, 专门针对电动汽车用驱动电机系统的电磁兼容性要求和试验方法, 标志着新能源汽车电驱动系统EMC测试的发展方向。

3.3 医疗设备

在医疗设备领域, 比如生命支持设备(呼吸机、起搏器、除颤器)、诊断设备(MRI、CT、X光机、超声、心电图/脑电图仪)、治疗设备(射频消融、电刀)、监护设备、植入式设备, EMC标准的应用更是至关重要, 干扰可能导致设备误动作(如起搏器停止工作、输液泵过量给药), 直接威胁患者生命, MRI、ECG等高灵敏度设备极易受干扰, 噪声会导致图像伪影或信号失真, 影响诊断结果, 它们直接关系到患者安全和设备的有效性。YY0505-2012标准等同采用IEC60601-1-2:2004, 适用于所有没有专业标准或专业标准中对EMC未作出规定的设备和系统, 但不适用于植入式医用电气设备。此外, GB/T18268.1-2010和GB/T18268.26-2010两个标准针对检验诊断类医用电气设备, 规定了电磁兼容性试验配置、工作条件、试验要求以及骚扰限值和抗扰度要求。

GB/T18268.1-2010《测量、控制和实验室用的电气设备电磁兼容性要求第1部分: 通用要求》: 该标准针对检验诊断类医用电气设备, 规定了电磁兼容性的通用

要求,包括发射和抗扰度的测试项目。而IEC60601-1-2:2014(这是国际标准),主要包括与风险管理文件(RMF)和医疗设备的期望上,以提供基本安全和本性能,而不会干扰或干扰其打算使用的电磁环境中的其他设备。它强调了测试前需要明确的通过/未通过标准,以及免疫要求的测试水平有所提高。

3.4 工业自动化与控制系统

在PLC、DCS、变频器、伺服驱动器、机器人、过程传感器、SCADA系统、工业物联网设备中,干扰导致控制系统误动作、通信中断、驱动器故障,造成生产线停机、产品报废,经济损失巨大。存在强骚扰源(大功率电机、变频器、开关电源、电焊设备),同时控制系统对精度和稳定性要求高。在化工、能源等领域,控制系统失效可能引发安全事故。

3.5 信息与通信技术

在数据中心服务器/交换机、基站(4G/5G)、路由器/网关、手机/电脑等终端设备、有线/无线通信网络中,干扰导致数据错误、丢包、连接中断,影响通信质量和网络稳定性,高速数字电路(如DDR内存、SerDes接口)对噪声极其敏感,EMC设计(如阻抗控制、串扰抑制)是保证信号质量的关键。确保不同无线通信系统(蜂窝、WiFi、蓝牙、卫星)之间不产生有害干扰,高效利用有限频谱资源(FCC,CE等法规核心要求)。^[5]大量IT设备在办公室或家庭环境中密集使用需互不干扰。

3.6 能源电力系统

在智能电网设备(智能电表、继电保护装置、SCADA)、可再生能源发电(光伏逆变器、风力发电机变流器)、高压直流输电、电力电子设备。在干扰可能导致继电保护误动或拒动,引发大面积停电事故。电力电子设备(特别是大功率变流器)既是强骚扰源,也需要抵抗电网中的瞬态骚扰(开关操作、雷击)。确保智能电表在复杂电磁环境下计量准确。大量分布式光伏、风电逆变器接入电网,其EMC性能直接影响电网电能质量和稳定性。

4 挑战与未来发展趋势

电磁兼容(EMC)未来发展将面临以下六大方面的挑战。1)系统复杂度增加:设备功能集成度更高,系统间交互更紧密,EMC设计难度剧增;2)高频化与宽带化:5G/6G、高速数字电路、开关电源高频化等,使得

EMC问题向更高频段扩展,辐射问题更突出;3)成本与小型化压力:在保证EMC性能的同时,需控制成本并实现小型化、轻量化(尤其在汽车、航空航天);4)仿真驱动设计:EMC仿真工具(如CST,HFSS)在设计早期预测和解决问题的作用越来越大;5)标准持续更新:各领域EMC标准不断演进以适应新技术发展(如汽车的自动驾驶、5G-V2X,医疗的无线设备);6)全生命周期管理:EMC不仅是设计问题,还涉及生产、安装、使用、维护的整个生命周期。

结论

随着智能化技术的不断发展,电磁兼容EMC设计面临新的挑战。智能化趋势下,大量新技术的应用或将技术应用到新场景中,如自动驾驶、辅助驾驶、车载互联等,都对电磁兼容性提出了更高的要求。EMC设计不仅要满足整机检测认证标准,更要确保在复杂电磁环境中各关键功能和性能的可靠实现。

电磁兼容是保障现代电子系统可靠运行的核心技术。未来需从设计源头融入电磁兼容EMC思维,结合新材料与智能算法,推动测试手段升级,以适应高密度、高频化的电子发展趋势。同时,加强国际标准协同,为全球电子设备互操作性提供技术保障。

电磁兼容在重点领域的应用是保障安全、确保可靠、提升性能、满足法规、实现创新的基石。它从产品设计之初就融入系统工程,贯穿整个生命周期。随着技术的飞速发展(电气化、智能化、网联化),电磁兼容EMC的重要性只会愈发凸显,成为制约或推动这些领域发展的关键因素之一。忽视EMC可能带来灾难性后果,而优秀的电磁兼容EMC工程则是产品成功不可或缺的核心竞争力。

参考文献

- [1].ClaytonR.P.IntroductiontoElectromagneticCompatibility.Wiley,2018.
- [2].IEC61000-4Series.ElectromagneticCompatibilityTestingStandards.
- [3].WilliamsT.EMCforProductDesigners.Newnes,2019.
- [4].ZhangQ.etal."AdvancedShieldingMaterialsfor5GApplications."IEEETransactionsonEMC,2023.
- [5].中国国家标准化管理委员会.GB/T17626-2017电磁兼容试验和测量技术.