

电磁兼容技术

刘培国 刘继斌 李高升 编著
薛国义 覃宇建



科学出版社

电磁兼容技术

刘培国 刘继斌 李高升 编著
薛国义 覃宇建

科学出版社

北京

内 容 简 介

电磁兼容性能是电子信息设备和系统设计与使用过程中关注的重要方面。本书围绕电磁干扰三要素,系统阐述了电磁兼容理论,结合工程实践经验给出了电磁干扰问题的分析和解决方法。全书内容包括电磁兼容的内涵、信号完整性分析、非线性效应分析、复杂系统电磁兼容仿真预测、电磁兼容现场测量、电磁兼容设计、电磁兼容维护、电磁兼容评估、电磁防护技术以及电磁兼容新材料、新方法和新技术等。

本书既兼顾了电磁兼容领域知识的系统性和完整性,又有一定的理论深度和创新性,并紧密结合科研和工程实践经验,例证丰富,讲解深入浅出,适合作为高等院校硕士研究生的教材或参考书,也可以作为电子信息系统设计、研制、生产、使用和维护等单位 and 部门工程技术人员和管理人员的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容技术/刘培国等编著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046346-3

I. ①电… II. ①刘… III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第270014号

责任编辑:潘斯斯 于海云/责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨/责任设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:511 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在科学技术高度发达的今天，电磁波正得到越来越广泛的应用。广播、电视、雷达、通信、导航及遥测遥控等设备和系统数量快速增加，各种电磁能量通过辐射或传导的途径，以电波、电场和电流的形式，影响着电磁敏感设备的正常工作，带来了日益严重的电磁污染与电磁干扰。电磁污染和电磁干扰不仅对电磁敏感设备、产品的安全性与可靠性产生危害，还会对人类及生态产生不良影响。研究电磁兼容技术的目的就是减小环境电磁污染、控制电磁干扰以保障电子设备和系统正常工作。

电磁兼容是指设备在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态和能力，即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射导致不能接受的降级，也不会因其发射而导致同一电磁环境中其他设备出现不允许的降级。电磁兼容的研究范围非常广泛，几乎涵盖所有现代化领域，如电力、通信、交通、航天和医疗等，研究成果对于实现并保持电子信息设备与系统的和谐有序而兼容的工作状态具有重要的意义。

电磁兼容问题的分析和解决涉及多种学科门类，以电气和无线电理论为基础，并与微波、微电子、计算机、通信和网络以及材料等学科密切相关。电磁兼容学也是一门技术与管理并重的实用工程学，实施电磁兼容工程需要投入大量的人力和物力。为保障电磁兼容性，国内外有关组织已经制定了相当数量的电磁兼容标准和规范，并不断补充和完善。

本书从电磁兼容的基本概念和内涵出发，围绕电磁干扰源、耦合途径和敏感设备等电磁干扰三要素，阐述电磁兼容理论、方法和技术。全书共分 10 章。第 1 章阐述了电磁兼容的内涵，对电磁干扰与电磁兼容领域的部分概念进行了辨析，梳理了电磁兼容标准。第 2 章讨论了信号完整性问题，内容涉及射频和微波电路中信号完整性的含义及其测试与分析方法。第 3 章开展电路与系统非线性效应分析，研究了非线性建模方法，给出了敏感度的非线性双频测试方法，阐述了基于接收机的非线性敏感度双频测试与建模方法。第 4 章研究复杂系统电磁兼容仿真预测技术，包括空间辐射和线缆网络所涉及的电磁兼容问题。第 5 章分析电磁兼容现场测量技术，阐述了系统级电磁兼容现场测量的难点及关键技术，阐述了辐射发射特性测试中的环境干扰抑制技术，研究了辐射源现场快速测量技术，介绍了一套电磁兼容现场测量与分析系统。第 6 章研究电磁兼容设计技术，给出了实现电磁兼容的一般工程方法，重点阐述了电路特别是印刷电路板设计中提高电磁兼容性能指标的技术和方法。第 7 章阐述了电磁兼容维护技术，给出了电磁兼容维护的概念与内涵，阐述了电磁兼容预知性维护技术，介绍了电磁兼容模型综合的概念和实施方法，研究了电磁兼容维护效果评估方法。第 8 章阐述电磁兼容评估技术，分别从发射特性分析评估、敏感特性评估及综合分析评估等方面给出了方法和关键技术，特别介绍了电磁环境适应性分析评估和电磁兼容专家系统。第 9 章涉及电磁防护技术，分别研究了雷达防护、核辐射防护和强电磁防护方法与技术，并阐述了电磁信息泄露防护和生物电磁效应及其防护技术。第 10 章是对电磁兼容新材料、新方法和新技术的展望。

本书是作者近年来在电磁兼容与防护技术领域的理论研究和工程实践经验的总结，内

容全面，贴近实际。全书内容既具有较好的系统性，又融入了信息化设备与系统电磁兼容设计、测试、分析评估、维护保障等全寿命各工作环节的具体技术。本书可作为电子信息等相关专业高等院校硕士研究生的教学用书，也可作为相关领域工程技术人员和管理人员的工作参考用书。

本书由国防科学技术大学刘培国教授负责内容编排，参加编写的有刘继斌教授、李高升副教授、薛国义讲师和覃宇建副教授等。强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室的魏光辉教授、电磁兼容性国防科技重点实验室的侯冬云研究员和浙江大学的尹文言教授等审阅了全书。周东明副教授、卢中昊讲师和黄纪军副教授等为本书提供了具体指导并提出了宝贵意见，在此一并表示感谢。

电磁兼容是电子信息系统设计、研制与使用、维护中的一个重要领域，相关问题的研究、分析与解决涉及多个学科方向，综合性强，难度大。

由于作者能力和时间有限，书中不足之处在所难免，衷心希望广大读者批评指正。

编者

2015年5月

目 录

| | |
|---------------------|----|
| 前言 | |
| 第 1 章 电磁兼容内涵 | 1 |
| 1.1 电磁兼容基本概念 | 1 |
| 1.1.1 电磁兼容概念 | 1 |
| 1.1.2 电磁兼容三要素 | 2 |
| 1.1.3 电磁兼容技术 | 6 |
| 1.1.4 电磁兼容的作用 | 9 |
| 1.2 电磁兼容标准 | 10 |
| 1.2.1 电磁兼容标准化组织 | 10 |
| 1.2.2 电磁兼容标准制定与内容 | 13 |
| 1.3 相关概念间的关系 | 14 |
| 1.3.1 电磁骚扰与电磁干扰 | 14 |
| 1.3.2 电磁敏感和电磁兼容 | 14 |
| 1.3.3 传导干扰与辐射干扰 | 14 |
| 1.3.4 电子对抗与电磁兼容 | 15 |
| 1.3.5 电磁环境与电磁兼容 | 15 |
| 1.3.6 电磁频谱管理与电磁兼容 | 16 |
| 第 2 章 信号完整性分析 | 17 |
| 2.1 信号完整性基础 | 17 |
| 2.1.1 信号的时域波形与频谱 | 17 |
| 2.1.2 基本电路元件的物理基础 | 20 |
| 2.2 传输线理论基础 | 25 |
| 2.2.1 传输线方程 | 25 |
| 2.2.2 传输线工作参数与工作状态 | 28 |
| 2.2.3 传输线上的反射与损耗 | 29 |
| 2.3 传输线间的串扰 | 32 |
| 2.3.1 串扰的来源 | 32 |
| 2.3.2 容性耦合与感性耦合 | 33 |
| 2.3.3 近端串扰与远端串扰 | 33 |
| 2.4 差分传输线 | 35 |
| 2.4.1 差分对与差分信号 | 35 |
| 2.4.2 奇模、偶模与差分阻抗 | 36 |
| 2.4.3 差分传输优势 | 37 |
| 第 3 章 电路与系统的非线性效应分析 | 38 |

| | | |
|------------|-----------------------|------------|
| 3.1 | 电路与系统的非线性效应分析 | 38 |
| 3.1.1 | 经典的非线性模型 | 38 |
| 3.1.2 | 带外非线性模型 | 41 |
| 3.2 | 非线性敏感度的双频测试方法 | 43 |
| 3.2.1 | 双频测试的基本原理 | 43 |
| 3.2.2 | 自动双频测试系统硬件配置 | 47 |
| 3.2.3 | 双频测试案例 | 51 |
| 第4章 | 复杂系统电磁兼容仿真预测技术 | 66 |
| 4.1 | 天线电磁兼容性预测 | 67 |
| 4.1.1 | 简单预测 | 67 |
| 4.1.2 | 基于高频近似算法的预测 | 73 |
| 4.1.3 | 基于全波算法的预测 | 77 |
| 4.2 | 线缆电磁兼容预测 | 84 |
| 4.2.1 | 传输线模型 | 85 |
| 4.2.2 | 线缆间串扰预测方法 | 89 |
| 4.2.3 | 场线电磁耦合预测方法 | 96 |
| 第5章 | 电磁兼容现场测量技术 | 107 |
| 5.1 | 系统级 EMC 现场测量的难点及关键技术 | 107 |
| 5.1.1 | 系统级 EMC 现场测量的难点 | 107 |
| 5.1.2 | 电磁兼容现场测量关键技术 | 108 |
| 5.2 | 辐射发射特性测试中的环境干扰抑制技术 | 109 |
| 5.2.1 | 传统的虚拟暗室技术 | 109 |
| 5.2.2 | 基于阵列信号处理的环境干扰抑制技术 | 110 |
| 5.3 | 辐射源现场快速测量技术 | 133 |
| 5.3.1 | 宽带时域 EMI 测量技术 | 133 |
| 5.3.2 | 时频结合快速测量技术及其实现 | 140 |
| 5.4 | 现场测量与分析系统 | 147 |
| 5.4.1 | 系统集成设计 | 147 |
| 5.4.2 | 舰船平台的系统级电磁兼容现场测量 | 151 |
| 5.4.3 | 综合测试与干扰分析案例 | 158 |
| 第6章 | 电磁兼容设计技术 | 165 |
| 6.1 | 电磁兼容工程方法 | 165 |
| 6.2 | 电路设计中的电磁兼容性 | 175 |
| 6.2.1 | 电路方案设计 | 176 |
| 6.2.2 | PCB 设计 | 182 |
| 第7章 | 电磁兼容维护技术 | 188 |
| 7.1 | 电磁兼容维护内涵 | 188 |
| 7.1.1 | 电磁兼容维护的含义 | 188 |
| 7.1.2 | 电磁兼容维护的需求分析 | 188 |

| | | |
|--------------|-------------------|------------|
| 7.1.3 | 电磁兼容预知性维护 | 190 |
| 7.1.4 | 电磁兼容可靠性 | 191 |
| 7.2 | 电磁兼容模型综合概述 | 193 |
| 7.3 | 电磁兼容模型综合算法 | 196 |
| 7.3.1 | 统计分析方法研究与设计 | 196 |
| 7.3.2 | 神经网络方法研究及预测应用 | 205 |
| 7.3.3 | 群体智能仿生算法分析 | 216 |
| 7.3.4 | 模糊数学及电磁兼容性能预测应用 | 220 |
| 7.3.5 | 预测算法混合设计与分析 | 229 |
| 7.4 | 电磁兼容维护效果评估 | 231 |
| 第 8 章 | 电磁兼容评估技术 | 235 |
| 8.1 | 发射特性分析评估 | 235 |
| 8.1.1 | 概述 | 235 |
| 8.1.2 | 非标分析 | 236 |
| 8.1.3 | 标准分析 | 242 |
| 8.1.4 | 发射特性分析评估示例 | 247 |
| 8.2 | 敏感特性分析评估 | 248 |
| 8.2.1 | 概述 | 248 |
| 8.2.2 | 非标分析 | 249 |
| 8.2.3 | 标准分析 | 250 |
| 8.2.4 | 敏感特性分析评估示例 | 251 |
| 8.3 | 综合分析评估 | 252 |
| 8.3.1 | 耦合途径的确定 | 252 |
| 8.3.2 | 频点匹配 | 253 |
| 8.3.3 | 普通分析评估 | 254 |
| 8.3.4 | 非线性分析评估 | 256 |
| 8.3.5 | 综合分析评估示例 | 257 |
| 8.4 | 电磁环境适应性分析评估 | 259 |
| 8.4.1 | 人员活动区的电磁环境 | 259 |
| 8.4.2 | 燃油加注区域的电磁环境 | 260 |
| 8.4.3 | 电引爆设备处的电磁环境 | 260 |
| 8.4.4 | 关键区域分析评估示例 | 260 |
| 8.5 | 电磁兼容专家系统 | 261 |
| 8.5.1 | 专家系统的构造 | 261 |
| 8.5.2 | 专家系统在电磁兼容分析评估中的应用 | 263 |
| 第 9 章 | 电磁防护技术 | 265 |
| 9.1 | 雷电防护技术 | 265 |
| 9.1.1 | 雷电危害及常用防护措施 | 265 |
| 9.1.2 | 雷电对电子设备的影响 | 266 |

| | | |
|---------------|----------------------------|------------|
| 9.1.3 | 典型防雷措施 | 267 |
| 9.2 | 核辐射防护技术 | 270 |
| 9.2.1 | 核辐射防护基本措施 | 270 |
| 9.2.2 | 核辐射源安全防护 | 271 |
| 9.2.3 | 加速器辐射安全 | 275 |
| 9.2.4 | 同位素辐照装置安全 | 276 |
| 9.2.5 | 辐射环境安全 | 277 |
| 9.3 | 强电磁防护技术 | 278 |
| 9.3.1 | 强电磁脉冲源及强脉冲作用 | 278 |
| 9.3.2 | 强电磁脉冲耦合途径 | 280 |
| 9.3.3 | 强电磁脉冲毁伤效应 | 281 |
| 9.3.4 | 强电磁防护技术 | 282 |
| 9.4 | 电磁信息泄漏防护技术 | 287 |
| 9.4.1 | 电磁泄漏的危害 | 287 |
| 9.4.2 | 系统电磁泄漏产生机理 | 288 |
| 9.4.3 | 电磁泄漏防护 | 289 |
| 9.5 | 生物电磁效应及其防护技术 | 290 |
| 9.5.1 | 生物电磁效应现象 | 290 |
| 9.5.2 | 生物电磁效应机理 | 291 |
| 9.5.3 | 电磁环境卫生标准 | 293 |
| 9.5.4 | 电磁环境影响防护 | 295 |
| 第 10 章 | 电磁兼容新材料新方法新技术 | 297 |
| 10.1 | 电磁兼容发展现状 | 297 |
| 10.1.1 | 仿真预测技术 | 297 |
| 10.1.2 | 设计与全寿命周期控制技术 | 299 |
| 10.1.3 | 试验与评估技术 | 300 |
| 10.1.4 | 电磁防护技术 | 304 |
| 10.1.5 | 电磁兼容与防护材料 | 310 |
| 10.1.6 | 电磁生物效应 | 313 |
| 10.1.7 | 电磁兼容与防护标准 | 313 |
| 10.2 | 电磁兼容发展趋势 | 314 |
| 参考文献 | | 317 |

第 1 章 电磁兼容内涵

1.1 电磁兼容基本概念

自从麦克斯韦建立电磁理论、赫兹发现电磁波，一百多年来，电磁波得到了充分利用。在科学发达的今天，广播、电视、通信、导航、雷达、遥测遥控及计算机等技术迅速发展，尤其是信息、网络技术以爆炸性方式增长，电磁应用与开发快速扩张，产生电磁能量的源不断增长，各种电磁能量通过辐射和传导的途径，以电波、电场和电流的形式，影响着电磁敏感设备的正常工作，带来了越来越严重的电磁污染与电磁干扰。电磁污染和电磁干扰不仅对电磁敏感设备、产品的安全性与可靠性产生危害，还会对人类及生态产生不良影响。电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 技术的目的就是减少环境电磁污染、控制电磁干扰以保障电子设备正常工作^[1]。

1.1.1 电磁兼容概念

电磁兼容是指设备在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态和能力，即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射导致不允许的降级；也不会因其发射导致同一电磁环境中其他设备产生不允许的降级。这个定义的前一半体现的是设备的电磁干扰特性，即不对其他设备产生电磁干扰，不对环境造成电磁污染；后一半体现的是设备的电磁敏感特性，即不受其他设备的电磁干扰，不对电磁环境产生敏感反应^[2]。

符合电磁兼容的不同电子设备可以在一起正常工作，它们是相互兼容的，否则就是不兼容的。电磁兼容有时又称作电磁兼容性。某些场合两者通用，但是电磁兼容含义显然更广，电磁兼容性更偏重于从性能方面描述。

电磁兼容研究范围非常广泛，几乎涵盖所有现代化领域，如电力、通信、交通、航天、军工和医疗等。研究内容主要包括电磁干扰源特性、电磁能量传输、电磁干扰效应、电磁干扰抑制、电磁频谱利用和管理、电磁兼容性标准与规范、电磁兼容性测量与试验、电磁泄漏与静电放电等，涉及电磁干扰控制、测量、分析预测等方面。

从技术角度看，电磁兼容技术研究紧密围绕干扰源、耦合途径和敏感源三个要素展开，即研究干扰产生的机理、干扰源的发射特性以及如何抑制干扰的发射；研究干扰以何种方式、通过什么途径传播，以及如何切断这些传播通道；研究敏感设备对干扰产生何种响应，以及如何降低其干扰敏感度，增强抗干扰能力。

从学科角度看，电磁兼容学是一门综合性学科，以电气和无线电基本理论为基础，并与微波、微电子、计算机、通信和网络以及新材料等学科密切相关。电磁兼容学也是一门技术与管理并重的实用工程学，开展电磁兼容工程需要投入大量的人力和财力。为了保障电磁兼容工程的有序进行，国际标准化组织已经制定了相当数量的电磁兼容标准和规范，涉及面非常广泛，并不断补充新的标准、完善已有标准，这项工作将会持续不断。从世界

范围看,基本上各个国家都制定了相关政策,要求所有电子产品都必须进行电磁兼容检验,合格后方能进入市场。因此,我国政府和相关部门越来越关注产品和生产过程中的电磁兼容,不断制定相关电磁兼容标准,建立了不同规模的电磁兼容实验室、检测中心和电磁兼容认证机构^[3]。

研究电磁兼容必须了解电磁环境,有观点认为电磁兼容学科应称为环境电磁学。所谓电磁环境是指特定区域内各种电磁信号特性和信号密度的总和,其中信号特性包括频率特性、脉冲串特性、天线扫描特性、极化特性和功率电平特性等,信号密度主要指辐射源的数目或在接收动态范围之内电子系统可以接收到的每秒脉冲数。1988年,美国军队将电磁环境定义为“军队、系统或平台在预定工作环境中执行任务时可能遇到的在各种频率范围内电磁辐射或传导辐射的功率和时间的分布状况,是电磁干扰、电磁脉冲、电磁辐射对人体、兵器和材料的危害以及闪电和天电干扰等自然现象效应的总和”。电磁环境对军队、设备、系统和平台的影响归结为电磁环境效应,即电磁环境对军事力量、设备、系统和平台工作能力的影响,包含所有电磁学科,如电磁兼容、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、反电子干扰等。电磁环境的构成主体是电磁波,不同的电磁波具有不同的电磁频谱分布,虽然人类开发利用的可利用电磁资源频段在不断扩展,但是电磁频谱是一种有限电磁资源,电磁资源本身是不可再生的。电磁环境与自然环境一样,是我们无法回避、必须时刻面对的一种客观存在。在某种程度上,可以认为电磁环境对电磁设备的效应如同自然环境对我们人类的影响一样。

自从认识到电磁兼容问题以后,人们开始对电磁兼容问题产生的机理、预测和解决方法等进行研究,电磁兼容问题越来越受到重视并日益扩大,现已不只限于电子设备本身,还涉及电磁污染、电磁饥饿等一系列生态效应问题以及其他多方面的问题,电磁兼容一词似已不能包含目前电磁兼容研究的全部内容。最近,日本有关文献对电磁兼容作了如下定义:“电磁兼容是一门独立的学科,随着电磁能量利用的发展,它将研究:预测并控制变化着的地球和天体周围的电磁环境,为了协调环境所采取控制方法、各项电气规程的制定以及电磁环境的协调和电磁能量的合理应用等”。电磁兼容学科涉及的范围也会越来越宽,包括工程学、自然科学、医学、经济学、社会学等基础科学。

1.1.2 电磁兼容三要素

1. 电磁兼容三要素的介绍

任何电磁兼容研究都是围绕电磁干扰源、耦合路径(耦合途径)、敏感设备三个要素进行的,所以称为电磁兼容三要素。因为它们也是形成电磁干扰的三个要素,所以也称为电磁干扰三要素。电磁干扰源是指产生电磁干扰的元件、器件、设备或自然现象;耦合途径或称耦合通道是指把能量从干扰源耦合到敏感设备上并使该设备产生响应的媒介和通道;敏感设备是指对电磁干扰产生响应的设备。

所有电磁干扰都是由上述三个因素的组合而产生的,因此把它们称为电磁干扰三要素。由电磁干扰源发出的电磁能量,经过某种耦合通道传输到敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应并产生效果。当电磁干扰超过敏感设备的敏感度时,就会产生电磁干扰。这一作用过程及其效果,称为电磁干扰效应,作用机理如图 1.1 所示。

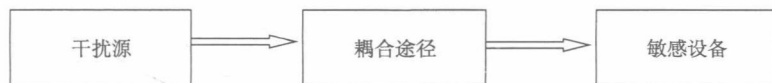


图 1.1 电磁干扰三要素

电磁活动产生电磁干扰的方式和途径不一，其中电磁辐射、传导是产生电磁干扰的主要电磁活动方式或途径。有的电磁干扰既以辐射方式也以传导方式传播。

为了分析研究电磁干扰的性质、影响等，必须确定电磁干扰的空间、时间、频率、能量、信号形式等特性。因此通常采用以下参数进行电磁干扰描述：频率宽度、频谱幅度或电平幅度、干扰波形、出现率、极化特性、方向特性等。这些特性与电磁干扰三要素密切相关。

电磁干扰可以存在，这三个要素缺一不可，因此，只要消除其中任何一个要素，电磁干扰问题也就解决了。作为电磁兼容工程师的主要任务就是决定哪一个是最容易消除的。以产品设计为例，电磁兼容性要求有两方面：降低辐射或传导的电磁能量、降低进入封装内的电磁能量或降低对进入封装能量的敏感。两者都与辐射和传导有关系。

当处理电磁干扰时，需要建立的意识是：频率越高，越可能是辐射耦合；频率越低，越可能是传导耦合。分析电磁干扰时，可以从以下五点入手。

- (1) 频率：产生问题的频率有哪些？
- (2) 强度(幅度)：电磁干扰有多强，引起的后果会多严重？
- (3) 时间：是连续的还是只存在一定的时间段？
- (4) 阻抗：干扰源和敏感设备的阻抗各为多大？两者之间传输电路阻抗多大？
- (5) 几何尺寸：辐射体的几何尺寸如何？射频电流的传输线路多长？

2. 干扰源分类

电磁干扰按照来源分为内部干扰源和外部干扰源两大类，分别列于表 1.1 和表 1.2。外部干扰源包括自然干扰源和人为干扰源。如果不特别指明，干扰源一般是指外部干扰源。

表 1.1 内部干扰源

| | |
|------|-------|
| 固有噪声 | 热噪声 |
| | 接触噪声 |
| 人为噪声 | 计算机 |
| | 开关 |
| | 电源 |
| | 反射 |
| | 静电放电 |
| | 非线性互调 |

表 1.2 外部干扰源

| | | |
|-------|-----------|-----------|
| 自然干扰源 | 大气干扰 | |
| | 雷电干扰、沉降静电 | |
| | 电离层干扰 | |
| | 宇宙干扰 | |
| | 热噪声 | |
| 人为干扰源 | 无意发射干扰源 | 交通设备 |
| | | 电力系统 |
| | | 照明器具 |
| | | 电动机械 |
| | | 家用电器 |
| | | 办公设备 |
| | | 工业、医用射频设备 |
| | 有意发射干扰源 | 广播 |
| | | 电视 |
| | | 通信 |
| | | 雷达 |
| | | 导航 |
| | | 核爆炸 |

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。自然干扰源既是地球电磁环境的基本要素、组成部分，又是对无线电通信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，也会对运载火箭发射产生干扰。

人为干扰源是指能产生电磁干扰能量的机电或其他人工装置，包括有意发射干扰源和无意发射干扰源。有意发射干扰源是指专门用来发射电磁能量的装置，如广播、电视、通信、雷达和导航等设备；无意发射干扰源是指本质上并不需要产生电磁能量，但是完成自身功能时会附带产生电磁能量发射的装置，如交通车辆、架空输电线、照明器具、电动机械、家用电器以及其他工业、医用设备等。

干扰源的分类方法很多，除了上述分类方法外，还可按照传播路径、辐射干扰的产生原因、不同设备的工作原理、频率范围划等原则进行划分。例如，按照电磁干扰发生性质可分为突发干扰、脉冲干扰、周期性干扰、瞬时干扰、随机干扰、跳动干扰等；按照电磁干扰信号频谱宽度可以分为宽带干扰源和窄带干扰源，干扰信号带宽大于指定敏感器带宽的称为宽带干扰源，反之称为窄带干扰源^[4]。

各类干扰的性质千差万别，表 1.3 列举了几类干扰的特征。电磁干扰既产生于电气电子设备，又干扰电气电子设备，造成设备的故障，带来经济和人员伤害。为了能够使各种设备互不干扰，正常工作，电磁兼容应运而生。

表 1.3 干扰源特性

| 干扰类型 | 干扰特征 |
|---------|-------------------------------------|
| 电力主干线干扰 | 上升时间小于 1ms, 下降时间数十毫秒, 峰值可达数十千伏 |
| 开关和继电器 | 上升时间数纳秒, 峰值可达数千伏 |
| 整流器电机 | 频率达数百兆赫兹, 重复频率达数十千赫兹 |
| 人体静电放电 | 上升时间小于 1~10ns |
| 半导体开断 | 上升时间为微秒到纳秒级, 重复频率从千赫兹到数十兆赫兹, 峰值达数百伏 |
| 开关电源 | 频谱覆盖 1kHz~100MHz |
| 数字逻辑电路 | 频谱覆盖 1kHz~500MHz |
| 工业和医疗设备 | 频率从数百赫兹到数吉赫兹, 功率数百瓦 |

需要注意, 同一个敏感设备对不同干扰会有不同响应, 因此特定的敏感设备就会对某些或某一类干扰比较敏感。例如, 数字电路比较敏感的干扰有电源干扰、电路反射、振铃(LC 共振: 上冲、下冲)、状态翻转干扰、串扰干扰(相互干扰、串音)、直流电压跌落等; 开关电源比较敏感的干扰包括出现在输出输入端子上的电流交流声、尖峰脉冲噪声、回流噪声等干扰, 以及影响内部工作的开关干扰、振荡、再生噪声等干扰; 交流电源比较敏感的干扰有高次谐波干扰、保护继电器或开关的震颤干扰、雷电浪涌、尖峰脉冲干扰等。

3. 电磁干扰耦合途径

任何电磁干扰的发生都必然存在干扰能量耦合途径。电磁能量传输有传导和辐射(空间)两种方式, 因此干扰耦合途径分为传导耦合和辐射耦合两大类, 如表 1.4 所示。

传导耦合是指干扰能量以电压、电流形式通过电路传导形成的耦合。传导耦合分为电路性耦合、电容性耦合和电感性耦合。

辐射耦合是指干扰能量以电磁波形式通过空间传播形成的耦合。辐射耦合分为三类: 甲天线发射的电磁波被乙天线接收, 称为天线对天线耦合; 空间电磁场经导线感应而耦合, 称为场线耦合; 空间电磁场经孔缝感应而耦合, 称为孔缝耦合。

表 1.4 电磁干扰耦合途径

| | | |
|--------------|------|-------|
| 电磁干扰 耦合途径 | 传导耦合 | 电路性耦合 |
| | | 电容性耦合 |
| | | 电感性耦合 |
| | 辐射耦合 | 天线耦合 |
| | | 场线耦合 |
| | | 孔缝耦合 |

实际设备间发生的电磁干扰通常包含多种电磁耦合, 如图 1.2 所示。正是由于多种耦合同时存在, 并反复交叉耦合, 才使电磁干扰变得难以分析和控制。

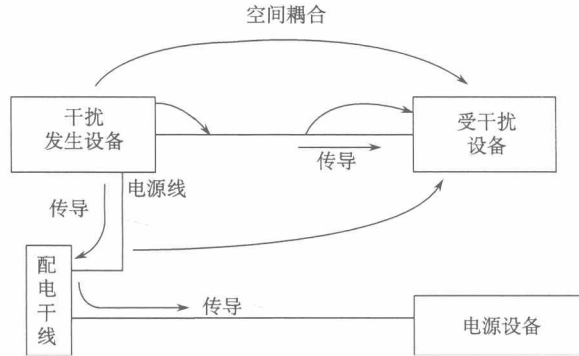


图 1.2 电磁干扰示意图

1) 辐射耦合

干扰源和敏感设备间的距离可以很近也可以很远，因此辐射耦合分为近场耦合和远场耦合。干扰源辐射的电磁能量通过天线、线缆、机壳等接收或感应进入敏感设备。

天线对天线耦合。在实际工程中，存在大量的天线电磁耦合。除了常规天线本身的耦合，还存在许多等效的天线耦合，如信号线、控制线、输入和输出引线等，它们不仅可以向空间辐射电磁波，也可以接收空间来波，从而具有天线效应，形成天线辐射耦合。

场线耦合。电缆线一般由信号线、供电线及地线等构成，其中每一根电缆导线都由输入端阻抗、输出端阻抗和返回导线构成回路。这些线缆受到干扰源辐射场照射时会感应产生电压或电流，并沿导线传输进入设备形成干扰。

孔缝耦合。当电磁波照射到孔缝时，如非金属设备外壳、金属设备外壳上的孔缝、电缆的编织金属屏蔽体等，会感应产生电压或电流并进入设备形成干扰。

2) 传导耦合

能形成传导耦合，干扰源和敏感设备之间必然有完整的电路连接，干扰能量沿着这个连接电路传递到敏感设备，并使之性能降级或发生故障。连接电路可能是导线、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。

电路性耦合。电路性耦合是最常见、最简单的传导耦合方式，包括直接传导耦合和共阻抗耦合两种形式。直接传导耦合是指导线经过存在电磁能量的环境时，拾取部分电磁能量并沿导线传导对电路形成干扰的耦合方式；共阻抗耦合是由于多个电路有公共阻抗而形成的，当一个电路的电流流经公共阻抗(如电源输出阻抗、接地线公共阻抗等)时，形成的电压就会影响到另一个电路。

电容性耦合。电容性耦合也称为电耦合，是由两个电路间的电场相互作用引起的。如果两个电路间存在电容，一个电路的电荷通过电容将影响另一电路。

电感性耦合。电感性耦合也称为磁耦合，是由两电路间的磁场相互作用引起的。如果两个电路之间存在互感，一个电路的电流通过互感耦合影响另一电路。

1.1.3 电磁兼容技术

电磁兼容技术可归结七个方面：综合论证技术、仿真预测技术、设计与全寿命周期控制技术、试验与评估技术、电磁防护技术、技术标准、新技术与新材料，如图 1.3 所示。下面主要介绍仿真预测技术、设计与全寿命周期控制技术及试验与评估技术的含义。

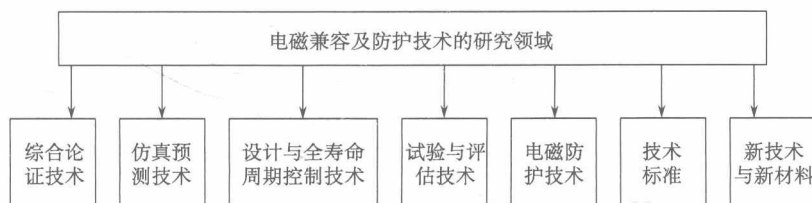


图 1.3 电磁兼容研究领域的分类

1. 仿真预测技术

电磁兼容仿真预测技术是指通过理论计算对武器装备电磁兼容性进行分析评估的方法。电磁兼容设计、实现和管理维护等都可能需要进行电磁兼容预测。通过预测分析确定电磁不兼容的环节和潜在因素，评价电磁兼容安全裕度的合理性，为方案实施、修改和防护措施采用提供依据。

电磁兼容预测主要采用仿真技术，根据预测对象的具体状态，用数学模型描述电磁干扰特性、传输特性和敏感度特性，进行仿真计算获得电磁兼容性结果。因此，电磁兼容预测必须建立干扰源模型、耦合途径模型和敏感设备模型。电磁兼容预测分析的数学方程往往是一组微分方程或积分方程，求解时必须根据边界条件对结果进行限定，这称为边值问题。电磁场的边值问题求解归纳起来有三种方法：第一种是严格解析法或解析法；第二种是近似解析法或近似法；第三种方法是数值法。

电磁兼容预测一般在三个级别上进行。第一个级别是芯片的电磁兼容预测。传统的芯片设计一般不考虑电磁兼容问题，当芯片工作在低速或低频时一般不会出现显著的电磁兼容问题。但当芯片工作在高频时，电磁兼容问题十分突出，它直接影响到芯片的质量，因此必须在芯片的设计时就考虑电磁兼容问题。目前，美国和其他一些西方国家的半导体芯片生产厂家把电磁兼容设计、预测作为生产的第一个主要过程。第二个级别是部件的电磁兼容预测，例如，印刷电路板、多芯线、驱动器等电子电气部件本身的电磁兼容预测，以及部件与部件之间的电磁兼容预测。据报道，美国 IBM 公司投入了许多优秀的科技人员进行电磁兼容研究与设计，以使他们的产品性能更加优越、更具竞争力，其他公司纷纷效仿。第三个级别是系统的电磁兼容预测，这是对一个诸如飞机、舰船、导弹、飞船等装有多种复杂电子电气设备的系统进行电磁兼容预测。

2. 设计与全寿命周期控制技术

电磁兼容设计是通过科学分配指标、合理系统布局、有效的线路设计和加固手段实现系统兼容的设计过程。科学、合理的电磁兼容设计不仅使系统兼容成为可能(避免欠设计)，而且可以有效地保持系统的作战性能、缩短研制周期、降低研制/使用/维护成本(避免过设计)。电磁兼容设计与系统/分系统/设备设计同步进行，以预测分析结果作为设计输入，主要进行如下工作：系统设计、指标分配、设备电磁兼容性评估与设计、系统再设计。从上面的分析可以看出，电磁兼容性分析预测的准确性是系统电磁兼容性设计成败的关键，而电磁兼容性指标分配的科学性、合理性是衡量系统电磁兼容设计水平的重要指标。

电磁兼容设计自下向上可以分为如下三个层次：芯片级电磁兼容设计、设备和分系统级电磁兼容设计、系统级电磁兼容设计。

全寿命周期电磁兼容控制技术是指贯穿于论证、设计、生产、使用、维护等各个阶段的干扰控制技术，全寿命周期的电磁兼容控制对于保证电磁兼容性能十分必要。科学、合理的论证与设计是实现电磁兼容的前提，而生产、使用、维护过程中的电磁兼容性控制，则是保证电磁兼容指标实现的关键。全寿命周期电磁兼容控制包括(不限于)如下主要工作内容：生产过程中严格的工艺流程和质量控制、电磁兼容性维护与质量保障。

3. 试验与评估技术

电磁兼容与防护试验及评估贯穿于设备、系统的电磁兼容性分析、建模、开发、检测和干扰诊断等各个环节。由于电磁兼容性测试的对象主要是干扰和噪声，不同于一般有用信号的测试，因此噪声的拾取、衡量和误差分析等都有自己的特点。对测试方法、测试仪器设备、测试场所和测试过程自动化的研究是电磁兼容性测试和试验技术研究的基本内容。

电磁兼容性测试包括干扰源的辐射发射与传导发射特性的测试、电子设备的辐射敏感度和传导敏感度的测试。由于干扰源和敏感设备种类繁多，用途不一，有军用、民用的，所占频带很宽，从几赫兹到几十吉赫兹，所以测试方法必须分频段并根据用途归类进行研究。

电磁兼容测试可以分为标准测量与现场测量。标准测量是指按照电磁兼容标准的规定进行的测量、测试或试验，多数是在实验室条件下进行的测量，所以有的文献也称为实验室测量。标准测量应该在规定的场所进行，如室外开阔场地、屏蔽室、屏蔽半暗室、混响室、横电磁波小室(TEMCell)、角锥型横电磁波小室(GTEMCell)等。如果由于设备物理方面的限制(尺寸、功率、服务需要等)无法在实验室按照基础标准的规定进行测试，那么唯一有效的方法就是在非标准的测试环境下对设备进行电磁兼容测试和评估，以确定其是否满足保护电磁环境的要求，这就是现场测量。现场测量是指由于测量场地、设施、测量项目等无法满足电磁兼容相关标准要求而进行的电磁兼容测量、测试或试验等。

标准测量可以依据相关标准在定标实验室、按照规定的测量流程和要求进行测量。而现场测量则是无法或者很难甚至根本没有可以依据的标准进行的测量，且现场测量具有在线测量、被测对象与其他设备和系统无法分离而同时工作、在复杂电磁环境下进行测量等特点，两者差别显著。表 1.5 总结了标准测量与现场测量的主要区别。

表 1.5 标准测量与现场测量的区别

| 因素 | 标准测量 | 现场测量 |
|----------|---------------|--|
| 测量场地 | 标准场地 | 多数在开放空间 |
| 电磁环境 | 干净，可控 | 复杂，不可控 |
| 测量对象尺寸 | 尺寸受限 | 尺寸不受限 |
| 测量对象背景 | —测量对象独立存在 | 测量对象可以是独立存在的，多数情况下，测量对象处于复杂系统、平台上或与其他系统共处 |
| 测量设备安放 | 测量点基本可以任意 | 测量点受限 |
| 测量对象工作状态 | 独立工作或工作参数可控运行 | 难以独立运行或工作参数难以可控运行，多数情况下是测量对象与其他相关或不相关系统共同工作(包括电气、机械等)，属于在线测量 |
| 测量数据 | 可重现 | 难以重现 |
| 评判依据 | 按照规范要求 | 参考规范 |