



工业和信息化部“十二五”规划教材



高等学校工程创新型“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类

电磁兼容基础

Electromagnetic
Compatibility Fundamentals

(第2版)

刘培国 章宇建 周东明 卢中昊 黄纪军 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



工业和信息化部“十二五”规划教材
高等学校工程创新型“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类

电磁兼容基础

(第2版)

刘培国 覃宇建 周东明 卢中昊 黄纪军 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从电磁兼容基本概念切入,介绍了电磁兼容的基本概念、标准和规范、发展现状与趋势以及相关术语;介绍相关的电磁基本原理,电磁辐射与散射,传导耦合以及瞬态干扰;阐述了电磁兼容预测技术,主要在系统级层面上进行干扰源、敏感器及耦合途径的建模与分析;介绍接地、搭接、屏蔽、滤波等4种常规工程方法;对电路设计中的电磁兼容进行了阐述;讲述电磁兼容测量中的标准、设备、场地和方法,以及现场测量技术;介绍了电磁频谱管理的概念、日常和战时频管以及频率划分和指配技术;最后对电磁兼容的应用进行了扩展。

本书内容简明,条理清晰,可作为高等学校电气、电子工程专业的基础教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容基础/刘培国等编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2015.1

ISBN 978-7-121-25082-8

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(2014)第 288425 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:20.5 字数:538 千字

版 次:2008 年 7 月第 1 版

2015 年 1 月第 2 版

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价:46.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第2版前言

电磁兼容是一门综合性交叉学科,与电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术等学科相互渗透。其核心是电子、电磁理论,工程实践性强,是电子、电力、电气专业人员必须掌握的基础知识和技术。

随着科学技术的飞速发展,电磁环境日益复杂,电子电气设备面临着越来越多的干扰,造成性能降低、功能丧失的概率显著增加。一方面,为了实现众多设备的兼容工作,产品从设计、制造到使用都必须符合电磁兼容规范和标准,实行电磁兼容认证,加强电磁兼容测试和管理;另一方面,必须对相关人员进行培训,增加对电磁兼容的认识,掌握电磁兼容的技术手段。

本书在第一版的基础上做了大量修改,融合了电磁兼容领域最新的理论成果,对多章进行了重新排序,并对内容进行修正。第1章扩展了内容。第3章从编排和内容上都进行了大的调整,以反映当前预测技术的发展。从系统级预测的角度,阐述了天线集合、线缆集合电磁干扰的建模与分析,电子设备的射频收发特性以及无意发射源建模,并且详细介绍了国内外的电磁兼容预测软件。原书第5章中的电路设计中的电磁兼容单独成章,并扩充内容。原书第7章测量提前为第6章,并在内容上作了极大扩充。结合当前技术水平对仪器设备和场地进行了详细介绍;增加了发射和抗扰度测量的内容;最后结合作者科研工作对现场条件下的电磁兼容测量方法进行了阐述。原书第6章频谱管理改为第7章,整理了行文条理,增加了日常频管和战时频管两个方面的内容。新增第8章应用是在原书第5章后半部分的基础上增加雷电防护、强电磁脉冲防护、信息泄露防护和生物电磁效应的内容形成的。同时还对原书存在的格式、文字和图表错误进行了修正。

本书适用于电子、通信、信息工程专业的本科电磁兼容课程,也可作为专业工程技术人员的参考书。学习本书之前需要预修电路、信号与系统、电磁场与微波技术等基础课程。

本书由刘培国、覃宇建、周东明、卢中昊、黄纪军等同志编写,刘培国同志统编全稿。

编写过程中得到国防科学技术大学电子科学与工程学院刘继斌副教授、李高升副教授、薛国义讲师的帮助和支持,博士生余定旺、硕士生刘晨曦、张洪波等校稿,对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢。在本书编写过程中,作者参阅和部分引用了国内外许多专家学者的论文和著作,因数量众多不一一列举,在此一并表示感谢。

电磁兼容学科内容丰富,发展迅速,本书不能面面俱到。由于作者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

作者

2014年12月于湖南长沙

目 录

| | |
|-------------------|----|
| 第 1 章 电磁兼容概述 | 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 | 5 |
| 1.1.4 电磁干扰现象 | 8 |
| 1.1.5 电磁兼容作用 | 10 |
| 1.2 电磁兼容标准和规范 | 11 |
| 1.2.1 电磁兼容标准化组织 | 11 |
| 1.2.2 电磁兼容标准制定与内容 | 13 |
| 1.3 电磁兼容发展现状与趋势 | 17 |
| 1.3.1 电磁兼容发展阶段 | 18 |
| 1.3.2 电磁兼容发展现状 | 18 |
| 1.3.3 电磁兼容发展趋势 | 31 |
| 1.4 电磁兼容相关术语 | 33 |
| 1.4.1 电磁兼容常用术语 | 33 |
| 1.4.2 电磁兼容概念的关系 | 37 |
| 第 2 章 电磁兼容的电磁原理 | 40 |
| 2.1 电磁基本原理 | 40 |
| 2.1.1 麦克斯韦方程 | 40 |
| 2.1.2 边界条件 | 41 |
| 2.1.3 唯一性定理 | 41 |
| 2.1.4 叠加原理 | 42 |
| 2.1.5 镜像原理 | 42 |
| 2.1.6 等效原理 | 42 |
| 2.1.7 互易定理 | 44 |
| 2.2 电磁辐射 | 45 |
| 2.2.1 基本电振子 | 45 |
| 2.2.2 基本磁振子 | 47 |
| 2.2.3 惠更斯元 | 48 |
| 2.2.4 电磁散射 | 49 |
| 2.3 传导耦合 | 50 |
| 2.3.1 电路性耦合 | 50 |
| 2.3.2 电容性耦合 | 51 |
| 2.3.3 电感性耦合 | 53 |
| 2.3.4 传导干扰 | 55 |
| 2.4 瞬态场 | 59 |

| | | |
|------------|-----------------|-----|
| 2.4.1 | 电快速瞬变脉冲群(EFT) | 60 |
| 2.4.2 | 雷击浪涌 | 60 |
| 2.4.3 | 静电放电(ESD) | 62 |
| | 习题与思考题 | 63 |
| 第3章 | 电磁兼容预测 | 64 |
| 3.1 | 原理和基本方法 | 65 |
| 3.1.1 | 电磁兼容预测基本原理 | 65 |
| 3.1.2 | 常用的电磁场数值计算方法 | 65 |
| 3.2 | 天线的电磁兼容预测 | 68 |
| 3.2.1 | 简单预测 | 68 |
| 3.2.2 | 基于高频近似算法的预测 | 73 |
| 3.2.3 | 基于全波算法的预测 | 76 |
| 3.3 | 线缆网络的电磁兼容预测 | 82 |
| 3.3.1 | 多导体传输线理论 | 84 |
| 3.3.2 | 求解多导体传输线的BLT方程 | 91 |
| 3.4 | 无线设备的射频收发特性 | 102 |
| 3.4.1 | 发射机模型 | 102 |
| 3.4.2 | 接收机模型 | 111 |
| 3.5 | 电子设备的无意发射源 | 118 |
| 3.5.1 | 数字电路产生的无意发射 | 118 |
| 3.5.2 | “无意天线”的辐射 | 121 |
| 3.6 | 电磁兼容预测软件介绍 | 123 |
| 3.6.1 | 国外电磁兼容相关软件 | 123 |
| 3.6.2 | 国内电磁兼容预测软件 | 125 |
| | 习题 | 140 |
| 第4章 | 电磁兼容工程方法 | 141 |
| 4.1 | 接地 | 141 |
| 4.1.1 | 接地的含义和分类 | 141 |
| 4.1.2 | 安全接地 | 142 |
| 4.1.3 | 信号接地 | 144 |
| 4.1.4 | 地线中的干扰 | 145 |
| 4.1.5 | 减小地线干扰的措施 | 147 |
| 4.2 | 搭接 | 152 |
| 4.2.1 | 搭接的目的和分类 | 152 |
| 4.2.2 | 搭接的方法和原则 | 153 |
| 4.3 | 屏蔽 | 154 |
| 4.3.1 | 屏蔽的作用和分类 | 154 |
| 4.3.2 | 屏蔽的原理和分析 | 154 |
| 4.3.3 | 屏蔽效能和屏蔽理论 | 160 |
| 4.3.4 | 屏蔽效能的计算 | 162 |
| 4.3.5 | 几种实用的屏蔽技术 | 169 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 4.3.6 电磁屏蔽设计要点 | 171 |
| 4.4 滤波 | 171 |
| 4.4.1 滤波器的分类 | 172 |
| 4.4.2 滤波器的频率特性 | 172 |
| 4.4.3 几种常用电磁干扰滤波器的原理和构成 | 173 |
| 4.4.4 滤波器的选择和使用 | 180 |
| 习题与思考题 | 181 |
| 第5章 电磁兼容设计 | 182 |
| 5.1 电路设计中的电磁兼容性问题 | 182 |
| 5.2 电路设计中的电磁兼容措施 | 183 |
| 5.2.1 电路方案设计 | 183 |
| 5.2.2 PCB设计 | 189 |
| 5.3 小结 | 194 |
| 习题 | 194 |
| 第6章 电磁兼容测量技术 | 195 |
| 6.1 概述 | 195 |
| 6.1.1 电磁兼容测量在电磁兼容学科领域中的重要位置 | 195 |
| 6.1.2 电磁兼容测量技术的发展 | 196 |
| 6.1.3 电磁兼容测量标准 | 197 |
| 6.1.4 电磁兼容测量结果评价 | 200 |
| 6.1.5 电磁兼容的测量单位及换算 | 201 |
| 6.2 电磁兼容测量设备及场地 | 205 |
| 6.2.1 测量仪器及设备 | 205 |
| 6.2.2 测量场地 | 217 |
| 6.3 发射测量 | 224 |
| 6.3.1 辐射发射测量 | 224 |
| 6.3.2 传导发射测量 | 229 |
| 6.4 抗扰度测量 | 236 |
| 6.4.1 辐射抗扰度 | 236 |
| 6.4.2 传导抗扰度测量 | 238 |
| 6.5 电磁兼容现场测量 | 244 |
| 6.5.1 系统级 EMC 现场测量项目 | 244 |
| 6.5.2 基于舰船平台的系统级电磁兼容现场测量 | 247 |
| 习题 | 257 |
| 第7章 电磁频谱管理 | 259 |
| 7.1 电磁频谱管理概念 | 259 |
| 7.1.1 电磁频谱管理的定义及内涵 | 259 |
| 7.1.2 电磁频谱管理的地位和作用 | 260 |
| 7.1.3 电磁频谱管理的原则与任务 | 260 |
| 7.2 日常电磁频谱管理 | 261 |
| 7.2.1 频率管理 | 261 |

| | | |
|------------|-------------------------|------------|
| 7.2.2 | 用频设备管理 | 265 |
| 7.2.3 | 台站(阵地)管理 | 266 |
| 7.2.4 | 频谱监测 | 267 |
| 7.2.5 | 有害干扰查处 | 268 |
| 7.3 | 战时频谱管理 | 269 |
| 7.3.1 | 战时电磁频谱管理的内容与原则 | 270 |
| 7.3.2 | 战时电磁频谱管理的组织指挥 | 271 |
| 7.4 | 频谱划分 | 273 |
| 7.4.1 | 频谱分配和使用的规定 | 273 |
| 7.4.2 | 典型移动通信系统中的频率划分 | 277 |
| 7.5 | 频率指配 | 279 |
| 7.5.1 | 频率指配的数学模型 | 279 |
| 7.5.2 | 图形标色 | 281 |
| 7.5.3 | 蜂窝网络规划工程应用的频率分配算法 | 283 |
| 7.5.4 | 现代频率指配算法简介 | 285 |
| | 习题 | 288 |
| 第8章 | 电磁兼容应用 | 290 |
| 8.1 | 雷电防护 | 290 |
| 8.1.1 | 雷电危害及常用防护措施 | 290 |
| 8.1.2 | 雷电对电子设备的影响 | 291 |
| 8.1.3 | 典型防雷措施 | 291 |
| 8.2 | 核辐射防护 | 294 |
| 8.2.1 | 核辐射防护基本措施 | 294 |
| 8.2.2 | 核辐射源安全防护 | 296 |
| 8.2.3 | 加速器辐射安全 | 299 |
| 8.2.4 | 同位素辐照装置安全 | 300 |
| 8.2.5 | 辐射环境安全 | 302 |
| 8.3 | 强电磁防护 | 302 |
| 8.3.1 | 强电磁脉冲源及强脉冲作用 | 303 |
| 8.3.2 | 强电磁脉冲耦合途径 | 305 |
| 8.3.3 | 强电磁脉冲毁伤效应 | 306 |
| 8.3.4 | 强电磁防护技术 | 306 |
| 8.4 | 电磁信息泄漏与防护 | 311 |
| 8.4.1 | 电磁泄漏概念及危害 | 311 |
| 8.4.2 | 电磁泄漏防护 | 312 |
| 8.5 | 生物电磁效应 | 313 |
| 8.5.1 | 生物电磁效应现象 | 313 |
| 8.5.2 | 生物电磁效应机理 | 314 |
| 8.5.3 | 电磁环境卫生标准 | 316 |
| 8.5.4 | 电磁环境影响防护 | 317 |
| | 参考文献 | 320 |

第 1 章 电磁兼容概述

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)技术的目的就是减小环境电磁污染、控制电磁干扰以保障电子设备正常工作。

1.1.1 电磁兼容概念

什么是电磁兼容呢?从概念上讲,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,不对环境构成电磁污染;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。

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,但是显然电磁兼容含义更广,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的,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。

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年美军将电磁环境定义为“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环境对我们人类的影响一样。

自从人们认识到电磁兼容问题以后,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,还涉及到电磁污染、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,日本文献对电磁兼容做了如下定义:“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

1.1.2.1 电磁兼容三要素

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,所以称之为电磁兼容三要素。因为它们也是形成电磁干扰的三个要素,所以也称之为电磁干扰三要素。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。

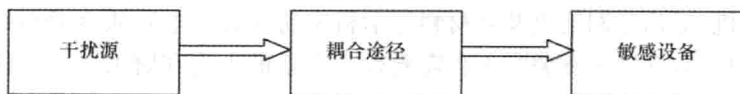


图 1-1 电磁干扰三要素

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5个方面入手。

- 频率:产生问题的频率有哪些?
- 强度(幅度):电磁干扰有多强,引起的后果会多严重?
- 时间:是连续的还是只存在一定的时间段?
- 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?
- 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?

1.1.2.2 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中。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,如机动车辆、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,如按照传播路径、辐射干扰的产生原因、不同设备的工作原理、频率范围划分等原则进行划分。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。

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。为了使各种设备能够互不干扰,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 | 上升时间纳秒,峰值可达数千伏 |
| 整流器电机 | 频率达数百 MHz,重复频率达数十千赫兹 |
| 人体静电放电 | 上升时间 1~10 纳秒 |
| 半导体开断 | 上升时间从纳秒至微秒,重复频率从千赫兹至数十兆赫兹,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 | 频率从数百兆赫兹至吉赫兹,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。

1.1.2.3 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。

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 |

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。辐射耦合分三类:甲天线发射的电磁波被乙天线接受,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。

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。

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。

(1) 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,例如信号线、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。

(2) 场线耦合

电缆线一般由信号线、供电线以及地线等构成,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。

(3) 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。

(1) 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,形成的电压就会影响到另一个电路。

(2) 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。

(3) 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。

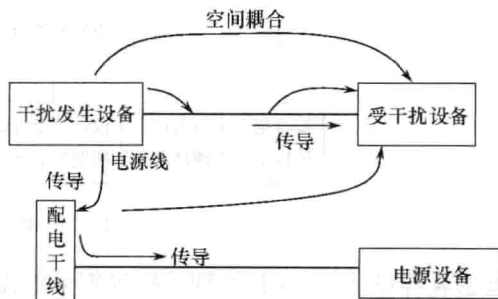


图 1-2 电磁干扰示意图

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。下面主要介绍一下仿真预测技术、设计技术以及实验评估技术的含义。

1.1.3.1 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。

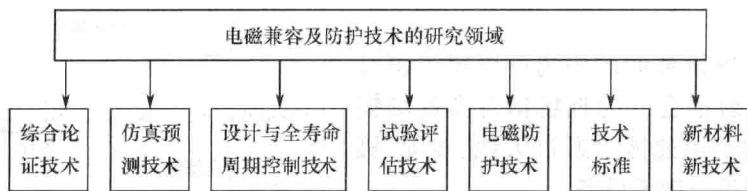


图 1-3 电磁兼容研究领域的分类

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,例如印制电路板、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 公司正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。

1.1.3.2 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),而且可以有效的保持系统作战性能、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。

1.1.3.3 测量试验与评估技术

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、噪声的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和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 Hz 到几十 GHz,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,所以有的文献也称之为实验室测量。标准测量应该在规定的场所进行,例如室外开阔场地、屏蔽室、屏蔽半暗室、混响室、横电磁波小室(TEM Cell)、角锥型横电磁波小室(GTEM Cell)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 现场测量与标准测量的区别

| 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,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 |

从原则上看,由于测试环境、条件的不同,现场测量与标准测量的最大差别在于:现场测量是在测量对象真实工作环境下的现场、在线测量,因此现场测量很难保证测量和测量数据的一致性和可重复性,而标准测量则相反。为了保证现场测量的价值和意义,需要保证通过测量数据分析后所得结果的一致性,否则就不必进行现场测量,因此带来的最大困难是测量数据的处理及其评判。因此,现场测量时为了获取有效、可靠、可信的反映测量对象电磁兼容性能的参数,需要考虑电磁环境干扰和其他设备的影响,处理、分析测量数据时需要根据测量场景、测量

环境、测量条件等因素考虑所测得数据的具体含义。当然,电磁现场测量最好能够按照相关电磁兼容标准进行,即使是无法或者没有可以依据的电磁兼容测量标准,电磁兼容现场测量流程、测量项目等也要尽量参考、借鉴可以利用的相关标准。

电磁兼容性测试和试验中使用的专门仪器通常有干扰场强测量仪、带预选器和准峰值适配器的频谱分析仪、数字或模拟存储示波器等,用于进行干扰的频域和时域测量。由于绝大部分认为无线电干扰都是脉冲性的宽带干扰,所以要求这些仪器具有良好的脉冲响应。与这些仪器配合使用的专用设备有各种天线、各种探头、功率吸收钳、人工电源网络、模拟产生辐射和传导干扰信号的各种干扰脉冲信号模拟器等。这些仪器设备的研究、开发、使用和自动测试系统的组建及测试软件开发等是测试仪器设备研究的主要内容。

自动测试系统(Auto Test System, ATS)是以计算机为核心,能自动完成某种测试任务的测量仪器组合和其他设备的有机整体。它将计算机技术、软件技术、智能仪器、总线与接口技术等有机地结合在一起。现在 EMC 测试中获得的测量数据基本上是表征单项电磁干扰参数的数据。随着数据融合技术和综合性多参数测试技术的发展,今后将采用多传感器、多参数测量和处理手段来获取单个的或综合的电磁兼容性参数指标,使测试系统的集成化、自动化程度越来越高。

1.1.4 电磁干扰现象

电磁能量传播是通过无形的空间辐射以及线缆传导进行的,所以电磁干扰往往不易觉察。实际上电磁干扰问题非常普遍,只是程度不同。可以说只要包含供电、开关的设备,不管其电压高低都会产生电磁干扰。220V 交流电源供电的设备存在电磁干扰,用 1.5V 电池工作的儿童玩具也会产生电磁干扰。电磁干扰如果没有对设备造成明显的后果则称之为电磁骚扰。

在进入信息化社会的今天,电磁波作为一种资源,已在 0~400GHz 宽频范围内广泛地应用于信息技术产品中,如汽车、通信、计算机、家电等,大量地进入社会和家庭,伴之而来的电磁干扰也从甚低频扩展到微波、毫米波、亚毫米波、THz 波段,给设备、系统以及生态带来危害。

1. 数字设备的电磁干扰

过去认为像电子计算机这类数字设备或系统,受自身和外来电磁干扰影响不会很大。尽管在系统设计和工程实现中,也自觉或不自觉地进行着防止和消除各种干扰的工作,但是实际上这类设备产生的电磁干扰仍然十分普遍。而且随着微电子技术的发展,计算机速度、灵敏度、集成度和功能等快速扩展,高速电子元件和电路以及高密度的空间结构,大大加重系统的辐射,同时低压、高灵敏度使系统的抗扰度降低,因此,电磁环境以及系统自身的电磁干扰严重地威胁着计算机和数字系统的稳定性、可靠性和安全性,电磁干扰就是计算机经常出现莫名其妙死机问题的主要原因之一。

2. 信息设备的电磁泄漏

计算机的键盘、显示屏等都会使信息辐射泄漏出去,如果泄漏的信息被敌方截获,将会造成巨大损失。美国不仅是最早利用电磁辐射泄漏获取情报的国家,也是最早重视防信息泄漏的国家。美国曾在纽约做过试验,将辐射信号截获设备“数据扫描器”装在汽车上,从曼哈顿南端的贝特利公园沿华尔街缓行,对沿途的海关大楼、联邦储备银行、世界贸易中心、市政厅、警察总局、纽约电话局以及联合国总部等单位正在工作的计算机进行辐射信号监测,获取到的信息达到惊人的量级。截获技术发展迅速,数年已经实现在 1km 之内获取清晰的屏幕图像。在通信网络方面,信号传播方式主要是电缆、光缆和无线电波,因此既可以电磁泄漏截获信息,也

可以利用传导泄漏截获信息,而且网络时代传导形式的泄密更严重。在20世纪70年代,美国在前苏联鄂霍次克海120m深的海底军事通信电缆上安装了一个6m长的窃听设备,大量记录了电缆的通信信号,由于前苏联没有采取任何加密措施,致使大量军事通信情报轻易地落在了美国人手中。美国在信息泄露的抑制技术方面也很先进,美国国家安全局和美国国防部从20世纪60年代开始,就研究制定并逐步完善防电磁泄漏标准。用于计算机及信息设备防信息泄露的研究被称作 Tempest 技术,IBM 开发的 Tempest 个人计算机、打印机、显示器等产品具有明显的市场竞争力。网络时代,信息泄露被认为是对网络安全的最大威胁。所以,防信息泄露已不再只是对军事领域才有意义,在经济领域及各行各业都应引起足够重视。

3. 雷电干扰

雷电和静电放电危害也属电磁干扰范畴。雷电不但对人类生存造成很大威胁,对树木、森林、建筑以及电气设备也会造成很大损害和破坏。据统计,地球每一秒钟就有100多次闪电,每次闪电产生的能量可供一个100W的灯泡点亮3个月;在雨季,平均每6分钟就有一个人被雷电击中;每年有成千上万的人因雷电击中,大片森林因雷电击中而起火烧毁;雷电还经常使高压电网以及通信出现故障,使供电和通信中断,引起城市交通失控。20世纪50年代,白金汉宫就是因一块窗帘布被雷电击中而起火燃烧;上海电视台平均每年要遭受33次大的雷击,每次雷击都会使电子设备遭受不同程度的损坏;1992年6月22日,北京国家气象中心多台计算机接口因感应雷击被毁,损失2000多万元;1992年8月23日,赣州市60%的有线电视和50%闭路电视遭受过雷击,其中91台电视机因感应雷击而毁于一旦;2006年6月9日,韩国一架大型客机在空中遭受雷击,幸好没有人员伤亡。

4. 交通运输系统

在飞机上不允许使用笔记本电脑、手机和听CD片等,原因就在于避免这些设备产生电磁干扰。一旦这些设备的电磁辐射通过机舱线缆藕合到飞机敏感仪器上形成干扰,就可能对飞机航行带来危险;如果这些电磁辐射透过机舱传播到空间,无论是被飞机自身传感器或天线接受,还是地面导航控制设备接收,就可能因此而增加飞机偏离航线或造成其他事故的可能性。

现代交通工具越来越多的依赖于电子系统。如果车(机)载接收、监控和定位等电子系统电磁抗扰度不够,就很容易受空间电磁环境干扰而不能正常工作,甚至失控造成事故,如气囊的保护失灵、定位错误等。如果铁路道岔的信号自动控制因电磁干扰造成误控,将会给列车带来不堪设想的灾难。

5. 微波射频系统

卫星地面站、雷达等都可能会受到高频波段电磁信号、核爆电磁波等干扰。美国正在研制新一代大功率微波武器,频率覆盖1~100GHz范围。可以想象,越来越强的微波辐射将会给电子设备或系统以及生物带来严重的破坏和杀伤。

日常生活中,手机的使用非常普遍。手机的电磁辐射是窄带微波辐射,在手机与基站建立通信信道时最大,第一声铃响后逐渐减小。因为人的大脑和眼睛对电磁辐射是比较敏感的,所以在手机接通后的最初几秒内,最好不要马上将手机贴耳接听,以免造成伤害。通话过程中,声调高低、声音大小、信道好坏不同手机辐射也有所不同。另外,不同类型手机,手机天线内置还是外置,手机的电磁辐射也有差别。

6. 医疗设备

医疗设备的电磁兼容性以及医疗单位的电磁环境值得关注。现在许多医疗器械都采用了先进的电子信息技术,抗扰度如何直接关系到病人的生命安全,如心脏起搏器容易受到计算