



西安电子科技大学
优秀教材一等奖



ENGINEERING
ELECTROMAGNETIC
COMPATIBILITY



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工程电磁兼容

(第三版)

路宏敏 编 著
赵晓凡 谭康伯 余志勇 李万玉

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

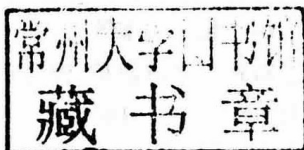
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

西安电子科技大学优秀教材一等奖

工程电磁兼容

(第三版)

赵晓凡 谭康伯 余志勇 路宏敏 李万玉 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在第二版的基础上修订的,第二版入选了“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,这次修订增补了 EMC 学科前沿的部分内容和标准更新情况、电磁兼容性仿真分析以及电磁兼容诊断与整改,重新编著了部分章节,并增加了第 12 章和第 13 章。

全书共 13 章,内容分别为绪论、电磁兼容基本概念、电磁骚扰的耦合与传输理论、电磁兼容性控制、屏蔽理论及其应用、接地技术及其应用、搭接技术及其应用、滤波技术及其应用、EMC 标准简介、EMC 测量、PCB 的电磁兼容性、电磁兼容性仿真分析、电磁兼容诊断与整改。各章后均附有习题和参考文献。

本书内容全面丰富、深入浅出,既有理论分析与基本原理阐述,又有工程应用问题的解决方法,具有较强的可读性和实用性。

本书适合电子信息工程、电磁场与无线技术、通信工程、仪器和测试技术、电气工程等电气信息类相关专业的师生使用,也可供航天、航空、电子和兵器等相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程电磁兼容/路宏敏等编著. —3 版. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.8

ISBN 978-7-5606-5375-4

I. ①工… II. ①路… III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 129929 号

责任编辑 蔡雅梅 雷鸿俊 刘玉芳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019 年 8 月第 3 版 2019 年 8 月第 6 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 27.5

字 数 654 千字

印 数 16 001~19 000 册

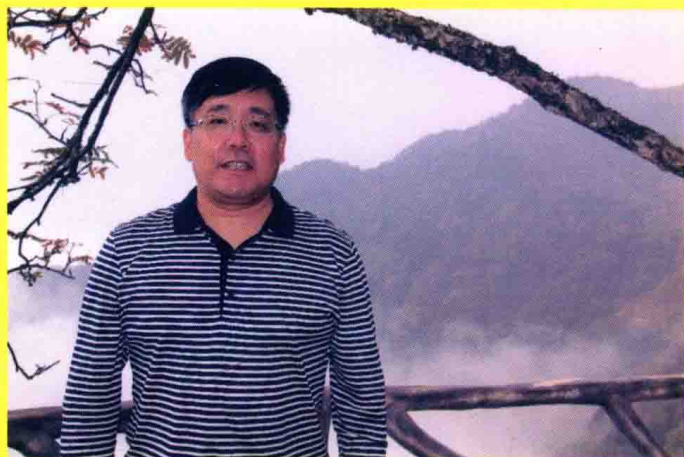
定 价 63.00 元

ISBN 978-7-5606-5375-4/TN

XDUP 5677003-6

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。



路宏敏，1961年6月生于陕西蒲城。西安电子科技大学教授、博导，超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室常务副主任，天线与微波技术国防科技重点实验室教授。

IEEE Member，陕西省电子学会电磁兼容委员会主任委员，中国兵工学会电磁技术专业委员会委员，中国计量测试学会电子计量专业委员会委员。电磁兼容性国防科技重点实验室客座教授，陕西省首批重大经济活动知识产权评议专家。

西安交通大学博士，西安电子科技大学博士后、学术带头人、师德标兵、教学名师。长期从事电磁场与电磁波、电磁兼容、微波技术与天线、电磁环境效应与防护技术的教学、科研工作。先后主持国家自然科学基金项目、国防科技预研基金项目、国防科技型号研发项目和横向科研项目50余项，发表技术论文90余篇（其中SCI、EI索引60余篇），出版普通高等教育“十二五”国家级规划教材《工程电磁兼容（第二版）》、《电磁场与电磁波基础（第二版）》等专著与教材6部。获陕西省高等教育教学成果奖特等奖1项，国家发明专利7项。

前 言

2018年是中国改革开放40周年,中国特色社会主义进入了新时代。2018年召开的第五次“全国教育大会”和“新时代全国高等学校本科教育工作会议”标志着中国高等教育进入了新时代。为了响应这两次重要会议的精神,我们对《工程电磁兼容(第二版)》进行了修订。本书自2003年初版和2010年9月再版以来,15年中广大读者和业内同行对本书提出了许多宝贵的意见和建议。据不完全统计,除西安电子科技大学电子信息类国家级特色专业选作本科教材外,十余所985和211高校均选用本书作为教材。众多国家骨干研究所和企业也选用本书作为电磁兼容技术培训参考书。本书深受读者好评,先后获得西安电子科技大学优秀教材一等奖、入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

信息化、智能化时代,人类活动的电磁环境日趋复杂。复杂电磁环境中产品的电磁兼容性、电子电气设备和系统的电磁环境适应性,已经成为产品功能实现、性能发挥和市场竞争的重要技术指标。电磁兼容(EMC)理论和技术基础宽广,工程实践性和综合性强,与许多学科交叉,是电子、电力、信息和其他相关领域从业人员必须掌握的专业基础知识。经济社会发展急需能够解决复杂工程问题且具有EMC专业知识的复合型人才,因此笔者对二版书进行了修订。

这次修订,以第二版为基础,广泛采纳读者的意见和建议,融合科学技术发展的前沿性和时代性,修正了一些不足之处,重新编著了“PCB的电磁兼容性”这一章的内容,对“EMC标准简介”这一章增添了一节内容,增加了“电磁兼容性仿真分析”和“电磁兼容诊断与整改”两章内容。

本书共13章,第11章由中国人民解放军火箭军工程大学余志勇教授(博士)编著,第13章由中国兵器工业集团第201研究所赵晓凡研究员编著,第12章由西安电子科技大学谭康伯副教授(博士)编著,第9章9.5节由中国兵器工业集团第206研究所李万玉研究员(博士)编著,其余部分由西安电子科技大学路宏敏教授(博士后)编著。全书由路宏敏教授统稿。

在编著本书的过程中,西安电子科技大学博士研究生官乔、张光硕、陈冲冲、陈鹏和刘玉龙以及硕士研究生孟晓娇、李敏玥、王坤博、宋丙鑫、王宇豪、胡宽、徐桃、谢旭彤、何川侠和赵能武等同学对本书的文字录入、图表绘制等作出了贡献。西安电子科技大学出版社的云立实、刘玉芳、蔡雅梅等编辑提出了建设性指导建议。在此对他们一并表示衷心感谢。

本书获得了西安电子科技大学教材建设基金的重点资助。

由于编著者水平有限,书中内容难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编著者

2018年12月

第二版前言

本书内容比第一版有较多的增补，主要增补了 EMC 标准简介、EMC 测量和 PCB 的电磁兼容性三章。此外，使用第一版的同行和读者提出了许多宝贵意见和建议，作者在本书中对此也作了修订和补充。

电磁兼容(EMC)是一门新兴的综合性交叉学科，与很多学科互相渗透、结合。它起源于解决实际中的无线电干扰问题，又在处理用电设备或系统的电磁兼容性过程中获得了发展。它是在无线电抗干扰技术的基础上，经过扩展、延伸和系统化所形成的一门新兴学科，是自然科学和工程学的一个分支。电磁兼容的理论基础宽广，工程实践综合性强，是电力、电子和其他相关领域从业工程师必须掌握的基础知识和技术。

复杂电磁环境下，产品的电磁兼容性是其功能实现和保障其生存能力的重要技术指标。社会急需 EMC 专门人才。为了满足市场需求和科学技术发展的要求，提高科技和产品的竞争力，必须对电子工程技术人员进行电磁兼容技术培训，对在校大学生、研究生进行电磁兼容性理论和技术的教育，加强电磁兼容性技术的研究。这就是本书的编写目的。

本书共 11 章。中国人民解放军第二炮兵工程学院余志勇副教授(博士)编写了第 11 章，中国兵器工业集团第 206 研究所李万玉研究员(博士)编写了第 10 章第 4 节，其余部分由路宏敏教授编写。全书由路宏敏统稿。

我们在编写本书的过程中，得到了西安电子科技大学梁昌洪教授、西安交通大学傅君眉教授的指导和建议。西安电子科技大学研究生滑润霞、张磊、张卫东、崔杨、张华等对本书的文字录入和图片绘制作出了贡献。西安电子科技大学出版社的云立实副编审也提出了不少建设性意见。在此对他们表示诚挚的感谢。

本书获得了西安电子科技大学教材建设基金的支持。

因编著者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，衷心希望广大读者批评指正。

编著者

2010 年 6 月

第一版前言

随着现代科学技术的发展,各种电子、电气设备已广泛应用于人们的日常生活、国民经济的各个部门和国防建设中。电子、电气设备不仅数量及种类不断增加,而且向小型化、数字化、高速化及网络化的方向快速发展。然而,电子、电气设备正常工作时,往往会产生一些有用或无用的电磁能量,影响其他设备、系统和生物体,导致电磁环境日趋复杂,造成了“电磁污染”,形成电磁骚扰。电磁骚扰有可能使电气、电子设备和系统的工作性能偏离预期的指标或使工作性能出现不希望的偏差,即工作性能发生了“降级”,甚至还可能使电气、电子设备和系统失灵,或导致寿命缩短,或使电气、电子设备和系统的效能发生不允许的永久性下降,严重时还可能摧毁电气、电子设备和系统,而且会影响人体健康。因此,人们面临着一个新问题,这就是如何提高现代电气、电子设备和系统在复杂的电磁环境中的生存能力,以确保电气、电子设备和系统达到初始的设计目的。正是在这样的背景下产生了电磁兼容的概念,形成了一门新兴的综合性学科——电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)。

电磁兼容是一门新兴的综合性交叉学科,与很多学科互相渗透、结合,其核心仍然是电磁场与电磁波。它起源于解决实际无线电干扰问题,并在处理用电设备或系统的电磁兼容性过程中获得了发展。它是在无线电抗干扰技术的基础上,经过扩展、延伸和系统化所形成的一门新兴学科,是自然科学和工程学的一个交叉学科,其理论基础宽广,工程实践综合性强,也是电力、电子和其他相关从业工程师必须掌握的基础知识和技术。

我国的电磁兼容性研究与国外科学技术发达的国家相比,起步晚,差距较大。加入WTO后,国产用电设备要站稳国内市场,进入国际市场,就必须符合相关EMC标准。为了适应市场要求和科学技术的发展,提高我国科技和产品的竞争能力,就必须对电子工程技术人员进行电磁兼容技术培训,对在校大学生、研究生进行电磁兼容性理论和技术的教育,加强电磁兼容性技术研究。这就是本书的编写目的。

本书是作者近年来在电子、航空航天、兵器工业等部门为部分工程技术人员举办电磁兼容性原理、技术和应用培训班,以及在西安电子科技大学讲授“电磁兼容”课程的讲稿基础上形成的。书中总结了作者从事电磁兼容性科学研究的部分成果和讲授“电磁兼容”课程的教学经验,吸收了国内、国外许多学者、专家的研究成果和资料。全书共分九章。第一章以实例介绍了电磁干扰与电磁污染的危害,引入了电磁兼容性的概念,叙述了电磁兼容学科的发展历史、研究内容和学科特点。第二章系统概述了电磁兼容的基础知识。第三章着重介绍电磁骚扰的耦合与传输理论。第四章论述控制电磁兼容性的策略和准则。第五章详细地介绍了电磁屏蔽的基本理论、分类和评价屏蔽效果的技术指标,叙述了计算屏蔽效能的电磁场方法和电路方法,并提出了几种规则形状屏蔽体的屏蔽效能计算公式;通过对屏蔽的平面波模型的分析,说明影响屏蔽效能的主要因素;最后介绍了孔隙的电磁泄漏及抑

制电磁泄漏的工程措施。第六章从接地的概念出发,阐述了接地的分类、导体阻抗的频率特性、地回路干扰的成因;介绍了屏蔽体接地的原理和方法;指出了抑制电磁干扰的接地点选择技术;分析了抑制地回路干扰的几种常用技术措施。第七章详细地介绍了搭接的一般概念,叙述了搭接的有效性及其影响因素,并涉及搭接实施的关键问题和处理方法;最后介绍搭接的设计、典型搭接举例和搭接质量的测量方法。第八章从滤波器件的应用角度出发,着重介绍滤波器件的类型、特性、工作原理、应用场合、选用、安装等内容。第九章分析传输线上任意位置处的集总激励源注入连接于传输线两端负载上的干扰电压和干扰电流;利用传输线理论建立高频传导干扰的模型;以矩阵表示传导干扰的负载响应,给出计算实例。

本书可作为高等院校有关专业的硕士研究生、高年级大学生的教材,也可作为电气、电子等相关专业的工程技术人员培训教材或参考书。

在本书的编写过程中,西安电子科技大学博士生导师王家礼教授对本书进行了全面审阅,西安电子科技大学前任校长、博士生导师梁昌洪教授对作者的编写工作给予了指导,西安交通大学博士生导师傅君眉教授对本书的内容也提出了许多宝贵意见和建议,西安电子科技大学电子工程学院电信系的朱满座、王新稳、赵永久副教授和西安电子科技大学硕士研究生李晓辉、周力、夏昌明、陈常杰、杜娟、刘宁艳、吴聪达、肖壮等参加了本书的编写工作,西安电子科技大学出版社的云立实副编审也提出了不少建设性意见,在此一并表示诚挚的感谢。

由于电磁兼容学科内容丰富,发展迅速,涉及面广,加之编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

编者

2003年3月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.2 自然电磁骚扰源	49
1.1 电磁干扰与电磁污染	1	2.5.3 人为电磁骚扰源	49
1.2 电磁兼容	8	2.6 电磁骚扰的性质	52
1.2.1 电磁干扰与电磁骚扰	9	2.7 电磁环境	54
1.2.2 电磁兼容的含义	9	2.7.1 环境的电磁现象	54
1.2.3 系统电磁兼容性	10	2.7.2 端口的概念	55
1.3 电磁兼容学科的发展	11	2.7.3 环境分类与设备位置	56
1.3.1 第二次世界大战前	11	2.8 电尺寸与电磁波频谱	57
1.3.2 第二次世界大战及其以后的 25 年	12	2.8.1 电尺寸	57
1.3.3 20 世纪 60 年代后	13	2.8.2 电磁波频谱	59
1.3.4 中国的电磁兼容发展概况	14	习题	62
1.4 电磁兼容的研究内容	16	参考文献	63
1.5 电磁兼容学科的特点	19	第 3 章 电磁骚扰的耦合与传输理论	65
习题	21	3.1 电磁骚扰的耦合途径	65
参考文献	21	3.2 传导耦合的基本原理	66
第 2 章 电磁兼容基本概念	24	3.2.1 电路性耦合	66
2.1 基本电磁兼容术语	24	3.2.2 电容性耦合	68
2.1.1 一般术语	24	3.2.3 电感性耦合	72
2.1.2 噪声与干扰术语	25	3.3 电磁辐射的基本理论	75
2.1.3 发射术语	26	3.3.1 电磁辐射的物理概念	76
2.1.4 电磁兼容性术语	27	3.3.2 基本振子电磁场分布的一般 表示式	76
2.1.5 相关术语之间的关系	29	3.3.3 近区场与远区场	79
2.2 电磁干扰的产生条件	30	3.3.4 近区与远区之间的转换区	81
2.2.1 电磁干扰三要素	30	3.3.5 高阻抗场和低阻抗场	82
2.2.2 敏感设备	32	3.4 近区场的阻抗	82
2.3 常用 EMC 单位及换算关系	34	3.4.1 电基本振子近区场的波阻抗	82
2.3.1 功率	36	3.4.2 磁基本振子近区场的波阻抗	83
2.3.2 电压	36	3.5 辐射耦合	85
2.3.3 电流	37	3.5.1 导体的天线效应	85
2.3.4 功率密度	37	3.5.2 辐射耦合方式	86
2.3.5 电场强度与磁场强度	38	习题	87
2.4 电缆的功率损耗与信号源特性	41	参考文献	87
2.4.1 电缆的功率损耗	41	第 4 章 电磁兼容性控制	89
2.4.2 信号源特性	44	4.1 分析和解决电磁兼容性问题的一般 方法	89
2.5 电磁骚扰源	48	4.1.1 问题解决法	89
2.5.1 电磁骚扰源的分类	48		

4.1.2 规范法	90	5.6.3 屏蔽效能计算的解析方法	125
4.1.3 系统法	90	5.7 孔隙的电磁泄漏	128
4.2 电磁骚扰的抑制策略	91	5.7.1 金属板缝隙的电磁泄漏	129
4.3 空间分离	92	5.7.2 金属板孔隙的电磁泄漏	130
4.4 时间分隔	93	5.7.3 截止波导管的屏蔽效能	132
4.5 频率划分和管制	93	5.7.4 孔阵的电磁屏蔽效能	133
4.5.1 频谱管制	93	5.7.5 通风窗孔的屏蔽效能	135
4.5.2 滤波	95	5.8 有孔阵矩形机壳屏蔽效能公式化	137
4.5.3 频率调制	95	5.8.1 理论分析	138
4.5.4 数字传输	95	5.8.2 结果与讨论	140
4.5.5 光电传输	95	5.8.3 结论	143
4.6 电气隔离	95	5.9 抑制电磁泄漏的工程措施	143
习题	96	习题	149
参考文献	96	参考文献	150
第5章 屏蔽理论及其应用	99	第6章 接地技术及其应用	153
5.1 电磁屏蔽原理	99	6.1 接地及其分类	153
5.1.1 电磁屏蔽的类型	99	6.1.1 接地的概念	153
5.1.2 静电屏蔽	100	6.1.2 接地的要求	154
5.1.3 交变电场屏蔽	101	6.1.3 接地的分类	154
5.1.4 低频磁场的屏蔽	102	6.2 安全接地	154
5.1.5 高频磁场的屏蔽	104	6.2.1 设备安全接地	154
5.1.6 电磁场屏蔽	105	6.2.2 接零保护接地	155
5.2 屏蔽效能	106	6.2.3 防雷接地	156
5.2.1 屏蔽效能的表示	106	6.2.4 安全接地的有效性	156
5.2.2 屏蔽效能的计算方法	107	6.3 导体阻抗的频率特性	157
5.3 无限长磁性材料圆柱腔的静磁屏蔽效能	108	6.3.1 直流电阻与交流电阻的广义描述	157
5.3.1 圆柱腔内的静磁场	108	6.3.2 导体电感	158
5.3.2 圆柱腔的静磁屏蔽效能分析	109	6.3.3 如何选择搭接条	160
5.3.3 圆柱腔的静磁屏蔽效能计算实例	110	6.4 信号接地	160
5.4 低频磁屏蔽效能的近似计算	111	6.4.1 单点接地	161
5.4.1 矩形截面屏蔽盒的低频磁屏蔽效能的近似计算	111	6.4.2 多点接地	163
5.4.2 圆柱形及球形壳体低频磁屏蔽效能的近似计算	112	6.4.3 混合接地	164
5.5 计算屏蔽效能的电路方法	112	6.4.4 悬浮接地	164
5.5.1 低频屏蔽问题的定性讨论	113	6.5 屏蔽体接地	164
5.5.2 屏蔽的电路方法	115	6.5.1 放大器屏蔽盒的接地	164
5.6 屏蔽的平面波模型	120	6.5.2 电缆屏蔽层的接地	165
5.6.1 导体平板的屏蔽效能	121	6.5.3 电缆屏蔽层的一端接地与两端接地	167
5.6.2 平面波模型推广到非理想屏蔽结构	124	6.6 地回路干扰	169
		6.6.1 接地公共阻抗产生的干扰	169
		6.6.2 地电流与地电压的形成	170
		6.7 电路的接地点选择	171

6.7.1	放大器与信号源的接地点选择	171	9.1.4	与 EMC 相关的其他 IEC 技术委员会	218
6.7.2	多级电路的接地点选择	172	9.1.5	有关地区和国家的 EMC 标准化组织	218
6.7.3	谐振回路的接地点选择	173	9.1.6	我国 EMC 标准化组织	219
6.8	地回路干扰的抑制措施	173	9.2	国际 EMC 标准简介	219
6.8.1	隔离变压器	173	9.2.1	标准体系和分类	220
6.8.2	纵向扼流圈	175	9.2.2	CISPR 标准简介	221
6.8.3	光电耦合器	177	9.2.3	IEC/TC77 标准简介	223
6.8.4	差分平衡电路	178	9.2.4	欧洲 EMC 标准简介	227
习题		180	9.2.5	美国 EMC 标准简介	236
参考文献		181	9.2.6	德国 EMC 标准简介	238
第 7 章	搭接技术及其应用	183	9.3	我国国家 EMC 标准简介	239
7.1	搭接的一般概念	183	9.3.1	我国国家 EMC 标准	239
7.2	搭接的有效性	185	9.3.2	我国国家军用 EMC 标准	245
7.3	搭接的实施	187	9.3.3	我国国家 TEMPEST 技术标准	248
7.3.1	搭接的电化学腐蚀原理	187	9.4	EMC 标准举例	249
7.3.2	搭接表面的清理和防腐涂覆	187	9.4.1	GJB 151A—97 简介	249
7.3.3	搭接的加工方法	188	9.4.2	GJB 152A—97 简介	251
7.4	搭接的设计	188	9.5	中国军用 EMC 标准更新简介	252
7.5	搭接质量的测试	192	9.5.1	军用设备和分系统 EMC 标准更新	252
习题		192	9.5.2	军用系统级 EMC 标准更新	255
参考文献		192	9.5.3	系统电磁环境效应试验方法	256
第 8 章	滤波技术及其应用	194	习题		256
8.1	滤波器的工作原理和类型	194	参考文献		257
8.1.1	滤波器的工作原理	194	第 10 章	EMC 测量	258
8.1.2	滤波器的类型	194	10.1	概述	258
8.1.3	EMI 滤波器的特点	195	10.1.1	EMC 测量分类	258
8.2	滤波器的特性	195	10.1.2	EMC 预测量与 EMC 标准测量	259
8.3	反射式滤波器	197	10.2	EMC 测量设施	260
8.4	吸收式滤波器	201	10.2.1	开阔试验场	260
8.5	电源线滤波器	205	10.2.2	屏蔽室	261
8.5.1	共模干扰和差模干扰	206	10.2.3	电波暗室	264
8.5.2	电源线滤波器的网络结构	206	10.2.4	横电磁波小室	265
8.6	滤波器的安装	208	10.2.5	混响室	266
习题		210	10.3	EMC 测量设备	269
参考文献		211	10.3.1	测量接收机	269
第 9 章	EMC 标准简介	215	10.3.2	电磁干扰测量设备	273
9.1	EMC 标准化组织	215	10.3.3	电磁敏感度测量设备	278
9.1.1	国际电工委员会(IEC)	215	10.4	EMC 测量实例	278
9.1.2	国际无线电干扰特别委员会(CISPR)	216			
9.1.3	TC77 的组织结构及其主要任务	217			

10.4.1 测量步骤和过程	278	12.4 仿真软件介绍	368
10.4.2 测量报告	287	12.5 车辆电磁兼容仿真分析案例	377
习题	294	12.5.1 车外天线空间特性仿真分析	378
参考文献	294	12.5.2 车体结构屏蔽特性仿真分析	383
第 11 章 PCB 的电磁兼容性	296	12.5.3 车内线缆耦合特性仿真分析	384
11.1 印制电路板的 EMC 特性	296	12.5.4 车内线缆辐射特性仿真分析	389
11.1.1 PCB 元器件	296	12.6 基于 FSS 加载的车辆电磁兼容设计	
11.1.2 PCB 走线带	298	案例	391
11.1.3 走线带的阻抗	300	12.6.1 车辆平台的电磁兼容性分析	391
11.2 印制电路板 EMC 设计技术	302	12.6.2 车载屏蔽用 FSS 的设计	392
11.2.1 印制电路板通用 EMC 设计		12.6.3 加载 FSS 后车辆电磁分布及屏蔽	
技术	302	效能分析	395
11.2.2 印制电路板 EMC 设计的一般		习题	396
原则	303	参考文献	397
11.2.3 印制电路板的叠层设计	308	第 13 章 电磁兼容诊断与整改	399
11.3 印制电路板的 EMC 实现	312	13.1 电磁兼容诊断基本内容	399
11.3.1 时钟电路	312	13.2 电磁兼容三要素及诊断原理	400
11.3.2 输入/输出及内部连接	314	13.2.1 电磁干扰的主要来源	400
11.3.3 背板及附属卡	316	13.2.2 电磁干扰的传播途径	401
11.3.4 散热片	318	13.2.3 敏感源	401
11.3.5 元件组	318	13.3 源头诊断法(PCB 板的设计诊断)	401
11.3.6 旁路、去耦和储能	321	13.3.1 标准测试法面临的风险	402
11.3.7 铁氧体元件	325	13.3.2 采用近场扫描诊断法的优势	402
11.3.8 集成电路	326	13.4 接口诊断法	403
11.4 印制电路板 EMC 仿真分析	329	13.4.1 电源接口	403
11.4.1 PCB 设计的 EMC 预测仿真	329	13.4.2 接地接口	403
11.4.2 印制线拐角的频域分析	334	13.4.3 信号接口	405
11.4.3 基于 ADS 的 EMC 特性仿真	338	13.4.4 机械接口	405
习题	344	13.5 试验诊断法	405
参考文献	345	13.5.1 发射类诊断	405
第 12 章 电磁兼容性仿真分析	352	13.5.2 敏感度诊断	406
12.1 电磁兼容仿真分析的基本原理		13.5.3 瞬态干扰诊断	408
及特点	352	13.6 电磁兼容诊断常用工具	410
12.2 电磁兼容仿真分析中的系统		13.6.1 近场扫描系统(EMSCAN)	410
综合性	355	13.6.2 近场探头测试	414
12.3 电磁兼容仿真分析方法	357	13.7 整机系统诊断法	418
12.3.1 有限差分法	358	13.7.1 案例一 整车系统辐射干扰故障	
12.3.2 矩量法	361	诊断	418
12.3.3 有限元法	362	13.7.2 案例二 复杂系统辐射发射超标	
12.3.4 高频方法	364	诊断	424
12.3.5 时域有限积分法	365	习题	429
12.3.6 传输线矩阵法	366	参考文献	429

第1章 绪 论

本章简明地介绍了电磁干扰对军用装备、工业设备、人类生活和生产环境以及人体产生的电磁危害案例；给出了电磁兼容性(EMC)、电磁干扰(EMI)的定义；回顾了电磁兼容的发展历史；介绍了电磁兼容的研究内容；指出了电磁兼容学科的特点。通过宏观概述，使读者对电磁兼容学科有一个清晰、全面的认识。

1.1 电磁干扰与电磁污染

现代科学技术的发展使各种电子、电气设备广泛应用于人们的日常生活、国民经济的各个部门及国防建设中。电子、电气设备不仅数量及种类不断增加，而且向小型化、数字化、高速化及网络化的方向快速发展。电子、电气设备正常工作时，往往会产生一些有用或无用的电磁能量，可能影响其他设备、系统和生物体所处的环境，导致电磁环境日趋复杂，造成电磁污染。下面介绍电磁干扰及电磁污染危害案例，以表明电磁环境保护及电磁兼容的重要性。

1. 土星V-阿波罗12事件

1969年11月14日上午11时22分，由美国土星V火箭运载的“阿波罗”12号宇宙飞船竖立在肯尼迪试验场的第39号发射架上准备发射，如图1-1所示。这是阿波罗计划的第五次飞行，也是第二次载人登月飞行。当时发射场的天气情况是：在距地面240~250 m及650~33 000 m之间有两层云，发射场周围细雨绵绵，在发射前后6小时内，周围无雷电，地面风速为7 m/s。这些条件基本符合允许发射的气象条件。火箭发射时，一切正常，飞行稳定。随着时间的推移，一百多米长的火箭和飞船逐渐变远、变小，火箭尾部喷出的火焰似乎在告诉人们它正按预定程序飞向太空。成功的喜悦愈来愈多地占据着人们的心田。可是，天公发怒了，当计时秒针走到第36.5 s、火箭飞行高



图1-1 土星V火箭

度达到 1920 m 时,从云层到火箭直到地面之间发生了雷电现象,只听到一声霹雳,就见两道平行的闪电从云中直劈下来。发射场上的 4 台摄像机都拍下了瞬间出现的雷电现象。火箭遭到了雷击。起飞 52 s、飞船高度达到 4300 m 时,闪电又一次击中飞船,这便是轰动一时的大型运载火箭和载人飞船在飞行中诱发雷击的事件。

由于雷击,飞船的电源被破坏,飞行控制中心的遥测信号突然消失,飞船的导航系统失效,飞行平台失控。幸亏飞船上装有备用电源,宇航员们及时修复了被损坏的设备,使“阿波罗”12 号飞船按时完成了飞行计划。美国及其他国家在发射导弹时也曾发生过类似事故。

故障分析及研究试验的结果表明,此次事故是由于火箭及其发动机火焰所形成的导体(火箭与飞船共长一百多米,火焰折合导电长度约 200 m)在云层至地面之间、云层至云层之间人为地诱发了雷电所造成的。

为什么火箭发射易诱发雷电呢?

在大气中没有雷电的情况下,由于人的活动改变了自然界大气电场而产生的雷电称为诱发雷电。诱发雷电的出现是与大气电场的被迫改变分不开的。通常,将一根长导体放在电场为 1×10^4 V/m 的大气中,若导体头部的电场发生突然变化,超过了 1×10^6 V/m,就能诱发雷电。据研究,此次土星 V 火箭发射时,地面电场为 3000 V/m,云中电场为 1×10^4 V/m。火箭起飞后,由于火焰及气流也能导电,因此火箭这一导体的长度不断增加,结果造成两端的电场急剧增大,火箭顶端和地面之间的电场达 2×10^6 V/m,这足以使大气被击穿而产生诱发雷电。由此可见,为防止和减少火箭飞行中出现诱发雷电事故,在发射场附近有雷电或云层厚度超过 1500 m 时,应停止发射。在发射火箭前,可以用小火箭、飞机、雷达等来测量大气电场强度,若大气电场强度超过诱发雷电的临界值,则必须停止发射。

2. 民兵 I 导弹飞行故障

民兵 I 导弹的遥测试验弹多次发射成功后,1962 年开始进行战斗弹状态的飞行试验。其前两发导弹的发射均遭到失败。这两次发射的故障现象相似,都是在导弹 I 级发动机关机前炸毁,一个高度为 7.6 km,另一个为 21.8 km。在炸毁前,两发导弹的制导计算机均因受到脉冲干扰而失灵。经过分析,故障是由于导弹飞行到一定高度时,在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电,它产生的干扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。

3. 英国“谢菲尔德”号导弹驱逐舰惨剧

1982 年 4 月初,阿根廷和英国因地处大西洋南部的马尔维纳斯群岛的主权问题发生战争。1982 年 5 月 4 日在大西洋马尔维纳斯群岛以南海域,阿根廷空军侦察情报系统收到英军“谢菲尔德”号导弹驱逐舰的目标指示数据后,派出了 3 架“超级军旗”攻击机接近目标。进入英军远程雷达警戒区后,其中 2 架“超级军旗”攻击机关闭机载雷达,飞行高度降至 40~50 m,以 900 km/h 的速度向目标接近。剩下的 1 架采取佯攻动作,迅速爬高,精确定位“谢菲尔德”号的航向、距离、航速等参数,并将数据及时发送给下面的 2 架超低空飞行的攻击机组。目标越来越近,在 46 km 处,攻击机组突然跃升至 150 m,并同时启动机载雷达。雷达锁定目标后,2 枚“飞鱼”式反舰导弹直扑目标。此时,“超级军旗”的机载告警系统“嘟嘟”作响,表明战机已被雷达锁定。随后,这 3 架“超级军旗”攻击机迅速转弯并急剧

下降高度，高速退出战场返航。

但战斗仍在继续。“飞鱼”式导弹发射数秒后，很快降至 15 m 高度转入巡航飞行段。在距“谢菲尔德”号 12~15 km 处，导弹进入搜索时刻，导弹上的主动雷达开始搜索并迅速捕捉到目标。这时，导弹迅速降到 2~3 m 浪尖高度实施掠海机动飞行。“谢菲尔德”号的舰载雷达警戒系统与舰载卫星通信系统的电磁兼容性差，不能同时工作。当它与英国本土通信时，恰遇阿根廷的“飞鱼”式导弹来袭。直到“飞鱼”式导弹近至“谢菲尔德”号 5 km 的目视距离时才被舰员发现。舰长急呼“注意规避”，并迅速启动密集阵防御系统向来袭导弹射击，但不幸的是，该系统因计算机故障竟然无法启动。这种情况下，一切都为时已晚。导弹击穿舰舷，经过数秒的沉寂后，弹头在舰体内轰然炸响，并引发大火。顿时，“谢菲尔德”号上烟雾弥漫，火光冲天。这艘造价高达 1.5 亿美元，首次参加实战的现代化军舰，很快沉没于南大西洋海底。图 1-2 为马岛冲突中，英国“谢菲尔德”号驱逐舰被阿方发射的“飞鱼”式导弹击中起火的情形。

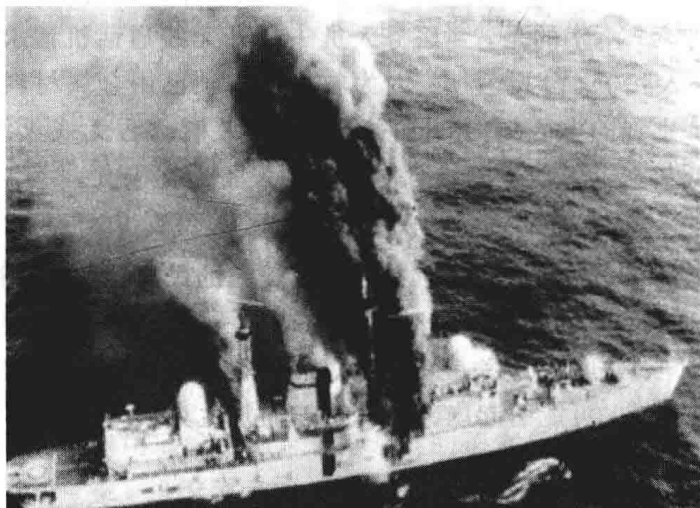


图 1-2 英国“谢菲尔德”号导弹驱逐舰被阿方发射的“飞鱼”式导弹击中起火的情形

1982 年 6 月 14 日，阿根廷与英国进行的争夺马尔维纳斯群岛主权的战争结束，英军重新占领该岛。

4. 大力神 III C 运载火箭故障

1967 年大力神 III C 运载火箭的 C-10 火箭在起飞 95 s、飞行高度达 26 km 时，制导计算机发生故障。C-14 火箭在起飞 76 s、飞行高度为 17 km 时，制导计算机也发生了故障。经过分析，故障原因是制导计算机中采用了液体循环冷却方案，冷却液体在外部带有钢丝编织网套的聚四氟乙烯软管内流动。此钢丝套软管是用经阳极化处理的铝支架分段固定的。金属网套的不少地方因支架阳极氧化层破裂而接地，但也有几段未接地。当冷却液体流动时，金属网套没有接地的部分与火箭地之间产生电压。当火箭飞行高度增加，气压下降到一定值时，此电压产生的火花放电使计算机发生了故障。

5. “宇宙神”导弹爆炸事件

一发“宇宙神”导弹在起飞数秒后即发生爆炸，并造成发射台严重损坏。经查，原因是接地汇流条与连接面之间的连接件因不够紧固而产生锈蚀，此锈蚀表面形成了非线性整流结(锈螺栓效应)，从而使指令接收机收到虚假指令信号而引起爆炸。

6. 可变速感应电动泵抽油站的电磁干扰

为了处理不断增长的北海石油矿藏, 苏格兰建立了两个 6 MW 可变速感应电动泵抽油站, 其中一个在 Negherly, 另一个在 Balbeggie。2001 年 10 月 16 日, 这两台设备一投入运行, 本地电站和电话局收到的投诉便如洪水般涌来。从区域看, 投诉集中在距离这两台设备的高空供电线(33 kV)12 英里(1 英里=1.6093 km)以内的范围。距离供电线 4 英里的付费电话非常嘈杂, 几乎不能使用。然而仅隔一条街道, 一住户的电话却不受影响。其他现象还有: 电视帧同步丢失(屏幕滚动), 辉光放电电路振铃。尽管这两台装置的设计符合电力工业的 G5/3 谐波标准, 但上述现象证实它包含更高次谐波。这个问题成为某些行业工作人员共同头痛的一个问题。最终, 这个问题引起了政府部门的注意, 并决定做些 EMC 补救工作。尽管这样做极度困难, 且石油泵站停机的代价非常高, 但最终还是完成了。

7. 医疗设备的失灵

1992 年, 医务工作者在将一心脏病病人送往医院的途中, 始终用救护车上的监视器/地震发生器对她进行观察。不幸的是, 当医务人员一打开无线通话机请求帮助时, 监视器就会关闭。结果这位病人死了。分析表明: 因为救护车车顶已由金属材料改为玻璃钢, 使得监视器单元暴露在特别强的电磁场内, 同时车内又安装有远程无线天线。这一事故证明: 汽车屏蔽效能的降低与强辐射信号的结合对监视器设备干扰极大。

8. 电吹风机引起的民事罚款

美国洛杉矶 Hartman 公司已同意支付 60 000 美元的民事罚款, 以补偿其 1992 年生产的型号为 Hartman Pro1600 的吹风机由于自身的缺陷所带来的损失。美国消费品安全委员会(CPSC)认定, 这种吹风机在开/关旋钮处于“断开”位置时仍能自动接通电源, 而且当加热器工作时, 其风扇不转, 可能引起内部器件过热而发生火灾。

9. 飞机导航系统的故障

美国航空无线电委员会(RTCA)曾在一份文件中提到, 由于没有采取对电磁骚扰的防护措施, 一位旅客在飞机上使用调频收音机时, 使导航系统的指示偏离 10° 以上。因此, 1993 年美国西北航空公司曾发表公告, 限制乘客在飞机上使用移动电话、便携电脑、调频收音机等, 以免骚扰导航系统。

10. 雷击引起的浪涌电压

雷击引起的浪涌电压属于高能电磁能量, 具有很大的破坏力。1976 年至 1989 年, 我国南京、茂名、秦皇岛等地的油库以及武汉石化厂均因遭受雷击而引爆原油罐, 造成惨剧。1992 年 6 月 22 日傍晚, 雷电击中北京国家气象局, 造成了一定的破坏和损失。因为雷击有直接雷击和感应雷击两种, 避雷针只能局部地防护直接雷击, 对感应雷击则无能为力, 所以对感应雷击需要采用电磁兼容防护措施。

11. 强电磁辐射对军械的危害

关于射频辐射能量对军械系统危害的问题, 最早是由英国人在 1932 年提出的。美国早在 20 世纪 50 年代就已发现电磁辐射对军械的危害问题(Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance, 简称 HERO 问题)。美国海军特别重视 HERO 问题, 这绝非偶然。为了提高舰船的战斗能力, 舰船上的无线电电子设备成倍增加, 但甲板的空间、面积有限, 不可能像在陆地上那样用拉开距离的方法来隔离。此外, 海军使用的无线电、雷达等的频带很宽、功

率很大,加上舰船上层建筑及金属构件的不规则反射,使通信和雷达天线的近场分布复杂,电磁环境恶劣。于是,舰船上的武器就可能在强电磁场环境中贮备、运输、安装和使用。也就是说,在舰船特殊的条件下,海军必须重视在强电磁场下武器的电磁易损性问题。

12. 电磁辐射对人体的危害

科学家致力于电磁辐射与生物体之间的相互作用的研究已有五十多年了。他们将辐射电磁能量在生物体中的吸收以及随之而来的生物物理和生物化学过程的直接相互作用定义为原始作用,将由原始作用所引起的生物机体的结构和功能的变化定义为生物效应。在原始作用的部位产生的瞬间生物效应可以引起进一步的急性和慢性的间接变化。

经过大量科学实验发现:高功率密度一般大于 10 mW/cm^2 ,此时以明显的热效应为主。长时间接受高功率密度的辐射,将会造成机体损伤甚至死亡;短间接接受高功率密度的辐射,将会引起眼睛的损伤,易引发白内障。在低于 1 mW/cm^2 的低功率密度下,热效应不起主要作用。长时间接受低功率密度的辐射,人类的神经系统、造血系统、细胞免疫功能会受损害。另外,电磁辐射对人类的遗传、生育功能也会产生影响。

13. 手机辐射——人类健康的潜在危险

手机是现代人们生活和工作常用的一种通信工具。随着科学技术的发展和水平的提高,手机的地位越来越重要,其普及程度也越来越广泛。然而,手机在为人们相互通信带来快捷和方便的同时,也带来了一些麻烦,尤其是给人们的健康带来了一些影响。目前世界各国的科学家和研究人员都在积极探索手机对人类健康所产生的危害,并正在采取相应措施来消除这种影响。

1) 电磁辐射形成污染

众所周知,手机在使用的过程中会产生电磁辐射,这种电磁辐射是以光速传播的,可以通过传输通道间的交互作用形成污染,干扰人类的正常活动。因此,世界各国对日益严重的手机电磁污染格外重视,纷纷制定相关法规治理手机电磁辐射环境。

早在1993年1月,美国各大报纸就曾在头版报道了佛罗里达州的凯瑞京状告 NEC 公司,诉其夫人因长期使用该公司的移动电话而致癌,要求该公司进行巨额赔偿。随后世界上相关的公司开始制定研究手机的生物效应计划,并着手降低移动电话对人体的电磁辐射强度。

尽管学术界对手机电磁生物效应的某些机理尚有争议,但不可否认其在一定条件下会对人体产生危害。瑞典的一家科研机构对一万多个使用手机的瑞典人作了一项调查,结果表明,使用手机越频繁的人,其身体不舒服的感觉越明显。科技工作者已研究证明:人体持续受一定强度的电磁辐射后会产生致热效应和非致热效应,可能会引起皮肤发热、眼球白内障、睾丸退化、身体疲倦、头痛、免疫功能下降等症状。

2) 手机微波易入人脑

瑞典隆德大学的研究人员近来还发现,手机发出的微波有可能为毒素进入人脑打开方便之门。隆德大学的一个研究小组是在对老鼠进行试验后得出这一结论的。他们把接受试验的老鼠置于一个相当于手机发出的微波量的环境中生活了一段时间,结果发现,老鼠血液中的白蛋白可以突破鼠脑中的防护层进入鼠脑。白蛋白是血液中的一个正常组成部分,但对鼠脑却有害。

隆德大学附属医院神经外科专家说,我们在鼠脑中发现了极微量的白蛋白,目前还不清楚这将对鼠脑造成什么样的伤害,但其他的试验已经显示,即使向鼠脑注射非常少量的