

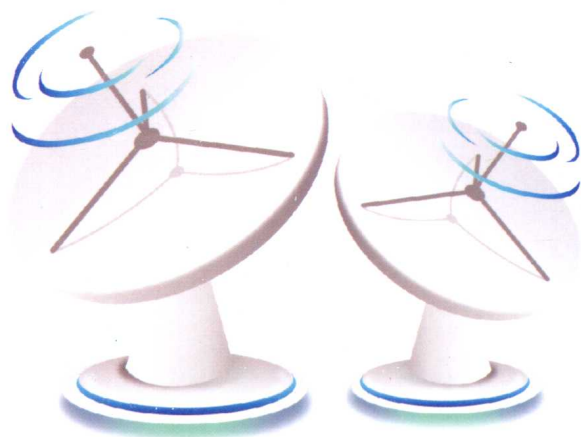
Engineering  
Electromagnetic  
Compatibility



# 工程电磁兼容

(第二版)

路宏敏 余志勇 李万玉 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

# 工程电磁兼容

(第二版)

路宏敏 余志勇 李万玉 编著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书从电磁兼容的基本原理出发,在充分考虑其工程应用背景的前提下,系统地介绍了电磁兼容(EMC)的基础知识、控制电磁兼容性的策略和方法、抑制电磁干扰的相关技术、电磁兼容标准和测量以及印制电路板(PCB)的电磁兼容性。本书内容丰富、深入浅出,既有理论分析与基本原理的阐述,又有工程应用问题的解决方法,具有较强的实用性和可读性。

本书是在第一版的基础上修订的。这次修订增补了 EMC 标准简介、EMC 测量和 PCB 的电磁兼容性三章内容。

本书适合电子信息工程、电磁场与无线电技术、通信工程、仪器和测试技术、电气工程等相关专业的师生使用,也可供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,余志勇,李万玉编著. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-5606-2466-2

I. ①工... II. ①路... ②余... ③李... III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 141275 号

策 划 云立实

责任编辑 阎 彬 云立实

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 xdupfb001@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 2010年9月第2版 2010年9月第4次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 22.375

字 数 526千字

印 数 10 001~13 000册

定 价 32.00元

ISBN 978-7-5606-2466-2/TN·0571

**XDUP 2758002-4**

\*\*\* 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。

# 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做出了贡献。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,影响其它设备、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,而且还将影响人体健康。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)。

电磁兼容学科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,并涉及到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到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的培训教材或参考书。

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 电磁兼容绪论

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1.1 电磁干扰与电磁污染 .....           | 2  |
| 1.2 电磁兼容 .....                | 9  |
| 1.2.1 电磁干扰与电磁骚扰 .....         | 10 |
| 1.2.2 电磁兼容的含义 .....           | 10 |
| 1.2.3 系统电磁兼容性 .....           | 11 |
| 1.3 电磁兼容学科的发展 .....           | 12 |
| 1.3.1 第二次世界大战前 .....          | 12 |
| 1.3.2 第二次世界大战及其以后的 25 年 ..... | 13 |
| 1.3.3 20 世纪 60 年代后 .....      | 14 |
| 1.3.4 中国的电磁兼容发展概况 .....       | 15 |
| 1.4 电磁兼容的研究内容 .....           | 17 |
| 1.5 电磁兼容学科的特点 .....           | 20 |
| 参考文献 .....                    | 22 |

## 第 2 章 电磁兼容基本概念

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 2.1 基本电磁兼容术语 .....       | 26 |
| 2.1.1 一般术语 .....         | 26 |
| 2.1.2 噪声与干扰术语 .....      | 26 |
| 2.1.3 发射术语 .....         | 28 |
| 2.1.4 电磁兼容性术语 .....      | 28 |
| 2.1.5 相关术语之间的关系 .....    | 31 |
| 2.2 电磁干扰的产生条件 .....      | 31 |
| 2.2.1 电磁干扰三要素 .....      | 31 |
| 2.2.2 敏感设备 .....         | 34 |
| 2.3 常用 EMC 单位及换算关系 ..... | 36 |
| 2.3.1 功率 .....           | 37 |
| 2.3.2 电压 .....           | 38 |
| 2.3.3 电流 .....           | 39 |
| 2.3.4 功率密度 .....         | 39 |
| 2.3.5 电场强度与磁场强度 .....    | 40 |
| 2.4 电缆的功率损耗与信号源特性 .....  | 42 |
| 2.4.1 电缆的功率损耗 .....      | 43 |
| 2.4.2 信号源特性 .....        | 46 |
| 2.5 电磁骚扰源 .....          | 49 |
| 2.5.1 电磁骚扰源的分类 .....     | 49 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 2.5.2 自然电磁骚扰源 .....   | 50 |
| 2.5.3 人为电磁骚扰源 .....   | 51 |
| 2.6 电磁骚扰的性质 .....     | 53 |
| 2.7 电磁环境 .....        | 56 |
| 2.7.1 环境的电磁现象 .....   | 56 |
| 2.7.2 端口的概念 .....     | 57 |
| 2.7.3 环境分类与设备位置 ..... | 58 |
| 2.8 电尺寸与电磁波频谱 .....   | 59 |
| 2.8.1 电尺寸 .....       | 59 |
| 2.8.2 电磁波频谱 .....     | 61 |
| 参考文献 .....            | 64 |

### 第3章 电磁骚扰的耦合与传输理论

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 3.1 电磁骚扰的耦合途径 .....         | 68 |
| 3.2 传导耦合的基本原理 .....         | 69 |
| 3.2.1 电路性耦合 .....           | 69 |
| 3.2.2 电容性耦合 .....           | 71 |
| 3.2.3 电感性耦合 .....           | 74 |
| 3.3 电磁辐射的基本理论 .....         | 78 |
| 3.3.1 电磁辐射的物理概念 .....       | 79 |
| 3.3.2 基本振子电磁场分布的一般表示式 ..... | 79 |
| 3.3.3 近区场与远区场 .....         | 81 |
| 3.3.4 近区与远区间的转换区 .....      | 83 |
| 3.3.5 高阻抗场和低阻抗场 .....       | 84 |
| 3.4 近区场的阻抗 .....            | 85 |
| 3.4.1 电基本振子近区场的波阻抗 .....    | 85 |
| 3.4.2 磁基本振子近区场的波阻抗 .....    | 86 |
| 3.5 辐射耦合 .....              | 88 |
| 3.5.1 导体的天线效应 .....         | 88 |
| 3.5.2 辐射耦合方式 .....          | 89 |
| 参考文献 .....                  | 90 |

### 第4章 电磁兼容性控制

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 4.1 分析和解决电磁兼容性问题的方法 ..... | 92 |
| 4.1.1 问题解决法 .....         | 92 |
| 4.1.2 规范法 .....           | 93 |
| 4.1.3 系统法 .....           | 93 |
| 4.2 电磁骚扰的抑制策略 .....       | 94 |
| 4.3 空间分离 .....            | 95 |
| 4.4 时间分隔 .....            | 95 |
| 4.5 频率划分和管制 .....         | 96 |
| 4.5.1 频谱管制 .....          | 96 |
| 4.5.2 滤波 .....            | 97 |
| 4.5.3 频率调制 .....          | 97 |
| 4.5.4 数字传输 .....          | 97 |



|                  |    |
|------------------|----|
| 4.5.5 光电传输 ..... | 98 |
| 4.6 电气隔离 .....   | 98 |
| 参考文献 .....       | 99 |

## 第5章 屏蔽理论及其应用

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 5.1 电磁屏蔽原理 .....                 | 102 |
| 5.1.1 电磁屏蔽的类型 .....              | 102 |
| 5.1.2 静电屏蔽 .....                 | 102 |
| 5.1.3 交变电场屏蔽 .....               | 103 |
| 5.1.4 低频磁场的屏蔽 .....              | 105 |
| 5.1.5 高频磁场的屏蔽 .....              | 106 |
| 5.1.6 电磁场屏蔽 .....                | 108 |
| 5.2 屏蔽效能 .....                   | 109 |
| 5.2.1 屏蔽效能的表示 .....              | 109 |
| 5.2.2 屏蔽效能的计算方法 .....            | 110 |
| 5.3 无限长磁性材料圆柱腔的静磁屏蔽效能 .....      | 110 |
| 5.3.1 圆柱腔内的静磁场 .....             | 110 |
| 5.3.2 圆柱腔的静磁屏蔽效能分析 .....         | 112 |
| 5.3.3 圆柱腔的静磁屏蔽效能计算实例 .....       | 112 |
| 5.4 低频磁屏蔽效能的近似计算 .....           | 113 |
| 5.4.1 矩形截面屏蔽盒的低频磁屏蔽效能的近似计算 ..... | 113 |
| 5.4.2 圆柱形及球形壳体低频磁屏蔽效能的近似计算 ..... | 114 |
| 5.5 计算屏蔽效能的电路方法 .....            | 115 |
| 5.5.1 低频屏蔽问题的定性讨论 .....          | 116 |
| 5.5.2 屏蔽的电路方法 .....              | 117 |
| 5.6 屏蔽的平面波模型 .....               | 123 |
| 5.6.1 导体平板的屏蔽效能 .....            | 123 |
| 5.6.2 平面波模型推广到非理想屏蔽结构 .....      | 126 |
| 5.6.3 屏蔽效能计算的解析方法 .....          | 127 |
| 5.7 孔隙的电磁泄漏 .....                | 130 |
| 5.7.1 金属板缝隙的电磁泄漏 .....           | 131 |
| 5.7.2 金属板孔隙的电磁泄漏 .....           | 132 |
| 5.7.3 截止波导管的屏蔽效能 .....           | 134 |
| 5.7.4 孔阵的电磁屏蔽效能 .....            | 135 |
| 5.7.5 通风窗孔的屏蔽效能 .....            | 137 |
| 5.8 有孔阵矩形机壳屏蔽效能公式化 .....         | 139 |
| 5.8.1 理论分析 .....                 | 140 |
| 5.8.2 结果与讨论 .....                | 142 |
| 5.8.3 结论 .....                   | 145 |
| 5.9 抑制电磁泄漏的工程措施 .....            | 145 |
| 参考文献 .....                       | 151 |

## 第6章 接地技术及其应用

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 6.1 接地及其分类 .....  | 156 |
| 6.1.1 接地的概念 ..... | 156 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 6.1.2 接地的要求 .....           | 156 |
| 6.1.3 接地的分类 .....           | 157 |
| 6.2 安全接地 .....              | 157 |
| 6.2.1 设备安全接地 .....          | 157 |
| 6.2.2 接零保护接地 .....          | 158 |
| 6.2.3 防雷接地 .....            | 159 |
| 6.2.4 安全接地的有效性 .....        | 159 |
| 6.3 导体阻抗的频率特性 .....         | 160 |
| 6.3.1 直流电阻与交流电阻的广义描述 .....  | 160 |
| 6.3.2 导体电感 .....            | 161 |
| 6.3.3 如何选择搭接条 .....         | 163 |
| 6.4 信号接地 .....              | 163 |
| 6.4.1 单点接地 .....            | 164 |
| 6.4.2 多点接地 .....            | 166 |
| 6.4.3 混合接地 .....            | 167 |
| 6.4.4 悬浮接地 .....            | 167 |
| 6.5 屏蔽体接地 .....             | 167 |
| 6.5.1 放大器屏蔽盒的接地 .....       | 167 |
| 6.5.2 电缆屏蔽层的接地 .....        | 168 |
| 6.5.3 电缆屏蔽层的一端接地与两端接地 ..... | 170 |
| 6.6 地回路干扰 .....             | 172 |
| 6.6.1 接地公共阻抗产生的干扰 .....     | 172 |
| 6.6.2 地电流与地电压的形成 .....      | 173 |
| 6.7 电路的接地点选择 .....          | 174 |
| 6.7.1 放大器与信号源的接地点选择 .....   | 174 |
| 6.7.2 多级电路的接地点选择 .....      | 175 |
| 6.7.3 谐振回路的接地点选择 .....      | 176 |
| 6.8 地回路干扰的抑制措施 .....        | 176 |
| 6.8.1 隔离变压器 .....           | 176 |
| 6.8.2 纵向扼流圈 .....           | 178 |
| 6.8.3 光电耦合器 .....           | 180 |
| 6.8.4 差分平衡电路 .....          | 181 |
| 参考文献 .....                  | 183 |

## 第7章 搭接技术及其应用

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 7.1 搭接的一般概念 .....        | 186 |
| 7.2 搭接的有效性 .....         | 188 |
| 7.3 搭接的实施 .....          | 190 |
| 7.3.1 搭接的电化学腐蚀原理 .....   | 190 |
| 7.3.2 搭接表面的清理和防腐涂覆 ..... | 190 |
| 7.3.3 搭接的加工方法 .....      | 191 |
| 7.4 搭接的设计 .....          | 191 |
| 7.5 搭接质量的测试 .....        | 195 |
| 参考文献 .....               | 195 |

## 第8章 滤波技术及其应用

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 8.1 滤波器的工作原理和类型 .....   | 198 |
| 8.1.1 滤波器的工作原理 .....    | 198 |
| 8.1.2 滤波器的类型 .....      | 198 |
| 8.1.3 EMI 滤波器的特点 .....  | 199 |
| 8.2 滤波器的特性 .....        | 199 |
| 8.3 反射式滤波器 .....        | 201 |
| 8.4 吸收式滤波器 .....        | 205 |
| 8.5 电源线滤波器 .....        | 209 |
| 8.5.1 共模干扰和差模干扰 .....   | 210 |
| 8.5.2 电源线滤波器的网络结构 ..... | 210 |
| 8.6 滤波器的安装 .....        | 212 |
| 参考文献 .....              | 214 |

## 第9章 EMC 标准简介

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 9.1 EMC 标准化组织 .....               | 220 |
| 9.1.1 国际电工委员会(IEC) .....          | 220 |
| 9.1.2 国际无线电干扰特别委员会(CISPR) .....   | 221 |
| 9.1.3 TC77 的组织结构及其主要任务 .....      | 222 |
| 9.1.4 与 EMC 相关的其他 IEC 技术委员会 ..... | 223 |
| 9.1.5 有关地区和国家的 EMC 标准化组织 .....    | 223 |
| 9.1.6 我国 EMC 标准化组织 .....          | 223 |
| 9.2 国际 EMC 标准简介 .....             | 224 |
| 9.2.1 标准体系和分类 .....               | 225 |
| 9.2.2 CISPR 标准简介 .....            | 226 |
| 9.2.3 IEC/TC77 标准简介 .....         | 228 |
| 9.2.4 欧洲 EMC 标准简介 .....           | 232 |
| 9.2.5 美国 EMC 标准简介 .....           | 241 |
| 9.2.6 德国 EMC 标准简介 .....           | 243 |
| 9.3 我国国家 EMC 标准简介 .....           | 244 |
| 9.3.1 我国国家 EMC 标准 .....           | 244 |
| 9.3.2 我国国家军用 EMC 标准 .....         | 250 |
| 9.3.3 我国国家 TEMPEST 技术标准 .....     | 253 |
| 9.4 EMC 标准举例 .....                | 254 |
| 9.4.1 GJB 151A—97 简介 .....        | 254 |
| 9.4.2 GJB 152A—97 简介 .....        | 256 |
| 参考文献 .....                        | 257 |

## 第10章 EMC 测量

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 10.1 概述 .....                  | 260 |
| 10.1.1 EMC 测量分类 .....          | 260 |
| 10.1.2 EMC 预测量与 EMC 标准测量 ..... | 261 |
| 10.2 EMC 测量设施 .....            | 262 |
| 10.2.1 开闢试验场 .....             | 262 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 10.2.2 屏蔽室 .....       | 263 |
| 10.2.3 电波暗室 .....      | 266 |
| 10.2.4 横电磁波小室 .....    | 267 |
| 10.2.5 混响室 .....       | 268 |
| 10.3 EMC 测量设备 .....    | 271 |
| 10.3.1 测量接收机 .....     | 271 |
| 10.3.2 电磁干扰测量设备 .....  | 275 |
| 10.3.3 电磁敏感度测量设备 ..... | 280 |
| 10.4 EMC 测量实例 .....    | 280 |
| 10.4.1 测量步骤和过程 .....   | 280 |
| 10.4.2 测量报告 .....      | 289 |
| 参考文献 .....             | 296 |

## 第 11 章 PCB 的电磁兼容性

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 11.1 PCB 元器件的 EMC 特性 .....    | 298 |
| 11.2 PCB 走线带的 EMC 特性 .....    | 299 |
| 11.3 PCB 的 EMC 设计技术 .....     | 302 |
| 11.4 PCB 电磁兼容性设计的一般原则 .....   | 303 |
| 11.4.1 PCB 板层布局原则 .....       | 303 |
| 11.4.2 PCB 元器件布局原则 .....      | 305 |
| 11.4.3 地线、电源线和信号线布置原则 .....   | 306 |
| 11.4.4 布线设计原则 .....           | 307 |
| 11.5 PCB 的 EMC 实现 .....       | 308 |
| 11.5.1 时钟电路 .....             | 308 |
| 11.5.2 输入/输出及内部连接 .....       | 311 |
| 11.5.3 背板及附属卡 .....           | 312 |
| 11.5.4 散热片 .....              | 314 |
| 11.5.5 元件组 .....              | 314 |
| 11.5.6 旁路、去耦和储能 .....         | 317 |
| 11.5.7 铁氧体元件 .....            | 321 |
| 11.5.8 集成电路 .....             | 322 |
| 11.6 PCB 的电磁兼容性分析商用软件简介 ..... | 325 |
| 11.6.1 EMC 仿真分析软件简介 .....     | 325 |
| 11.6.2 PCB 的电磁兼容性设计实例 .....   | 327 |
| 11.7 印制线拐角的频域分析 .....         | 334 |
| 11.7.1 印制线拐角特性阻抗突变的理论分析 ..... | 335 |
| 11.7.2 数值模拟结果与讨论 .....        | 336 |
| 11.7.3 主要结论 .....             | 339 |
| 参考文献 .....                    | 339 |

# 第 1 章



## 电磁兼容绪论

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性的重要性。

### 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、火箭飞行高度达到 1920 m 时,从云层到火箭直到地面之间发生雷电现象,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。

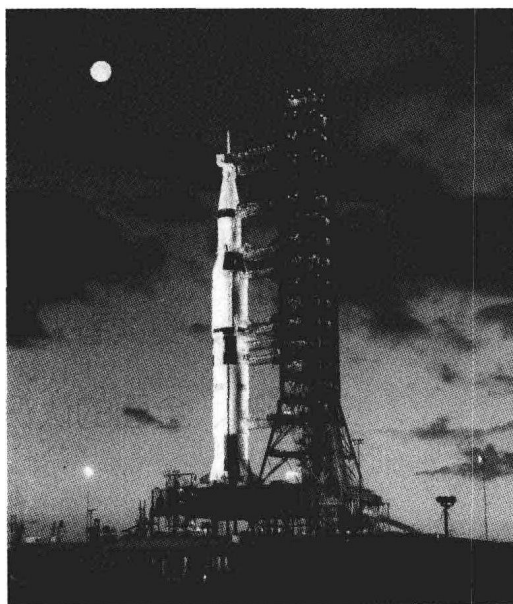


图 1-1 土星 V 火箭

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 $1 \times 10^4$  V/m的大气中,若导体头部的电场发生突然变化,超过了 $1 \times 10^6$  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 $1 \times 10^4$  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 $2 \times 10^6$  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”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”式导弹发射数秒钟后,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。舰长惊呼“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。

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。

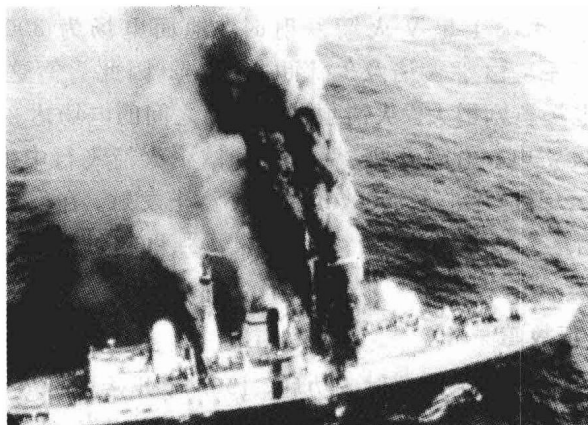


图 1-2 英国“谢菲尔德”号导弹驱逐舰被阿方发射的“飞鱼”式导弹击中起火的情形

#### 4. 大力神ⅢC 运载火箭故障

1967 年大力神ⅢC 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化氧化层破裂而接地，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/电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 $10^\circ$ 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