

电子设备的 电磁兼容性设计

理论 与实践

主 编 区健昌
副主编 林守霖 吕英华



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子设备的电磁兼容性 设计理论与实践

主编 区健昌

副主编 林守霖 吕英华

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书阐述了电磁兼容学科的基本理论、研究方法和设计原理;元件、设备、系统内部和系统间的设计与控制技术;对电磁兼容工程中的屏蔽、滤波、接地、PCB板、布线和接续等抑制技术进行了详尽分析和工程计算、举例;静电、雷电和电磁脉冲所涉及的电磁兼容防护理论、工程计算和实际举例;电磁兼容测量原理、诊断和标准测试方法,各种测量仪器性能和各种军民测量标准;电磁兼容性的故障诊断理论、监测技术与干扰识别、故障案例。本书的特色是电磁兼容学科涉及的面广且深,理论与实践紧密结合,与科技发展相同步。

本书可作为高等院校相关专业本科生和研究生教材,电子工程技术设计人员的参考书,也非常适宜作为电子工程技术培训教材。

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

电子设备的电磁兼容性设计理论与实践/区健昌主编. —北京:电子工业出版社,2010.3

ISBN 978-7-121-10418-3

I. 电… II. 区… III. 电子设备—电磁兼容性—设计 IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第029890号

策划编辑:孙延真

责任编辑:胡丽华

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:31.75 字数:833千字

印 次:2010年3月第1次印刷

印 数:3000册 定价:66.00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。

前 言

我国加入 WTO 和实施强制产品 EMC 认证制度以来,电磁兼容的重要性和必要性已被普遍接受。但是目前国内大多数电子工程师面对实际的设计任务时,仍然需要花费较大的精力去解决电磁兼容性的设计和工程问题;仍然需要不断提高和改进电磁兼容性的设计和工程能力。目前,国内电子行业的电磁兼容设备和测试水平普遍偏低,缺少必要的现场测试、诊断手段和能力,无法在本单位进行电磁兼容的预测或查找故障的测试。面对国际电子市场竞争的局面,这确实是个很遗憾的事实。

现在,进入了信息时代的今天,几乎所有的工程设计都与电子设备有关,技术人员设计的产品能否达到电磁兼容规范要求,已经成为衡量现代工程技术人员能否胜任技术工作的重要标志之一。对第一线工程技术人员而言,不断提高电磁兼容设计能力,是适应不断发展的工业化、信息化的形势要求,是提升自身价值的出类拔萃之道。编撰本书的目的就是希望提供一本能满足广大读者自学要求的实用电磁兼容设计教材。为此,我们在 2003 版《电子设备的电磁兼容性设计》专著的基础上,广泛查阅、收集近年来国内外电磁兼容领域各方面的最新发展成果、动向和趋势,并结合新形势下从事科技项目的实践成果及经验,重新编写了这本《电子设备的电磁兼容性设计理论与实践》专著。本版比《电子设备的电磁兼容性设计》专著有很大改动,全体编委都夜以继日地工作,有些章节更新的内容甚至达到总量的 50% 以上。

《电子设备的电磁兼容性设计理论与实践》专著的编委会由 6 人组成:区健昌教授任主编;林守霖研究员、吕英华教授博导任副主编。冯桂山高工、刘利华高工、孙明云副教授任编委。全书共 12 章。简述如下。

第 1 章:绪论。本章从电磁兼容一个多世纪的发展简史和主要国际组织机构开始,进而阐述电磁兼容学科和研究对象,其中特别对近期修订的 GJB1389A—2005《系统电磁兼容性要求》规范中的电磁环境效应做了介绍。继而,对电磁兼容的研究方法和产品质量的认证体系进行了阐述。

第 2 章:电子设备电磁兼容设计原理。本章全面阐述了现代的电子设备和电子系统设计的信号完整性、电磁兼容性、电子设备电磁兼容设计的内容及原理。特别是,本版明确地提出了“模板式的”电磁兼容分析和设计的理念,并且把这一理念贯穿到整章的撰写中,比较细致地介绍了分析各层次电磁兼容工程问题所需要的基本的理论模板。处理电磁兼容工程问题与处理电磁理论问题不同,更需要抓住主要矛盾、忽略次要矛盾的影响因素,采用简化的工程处理方法。实现这个理念的关键是采用模板分析方法,也就是利用本章给出的基本理论模板用到实际问题中去,将实际问题对应为理论模板和具体数据的集成体,在理解物理现象的基础上找到设计和分析的结论。相信经过本章的阅读,读者能喜欢模板式的分析建模方法。

第 3 章:电子电气系统电磁兼容性分析和设计。本章阐述了系统电磁兼容性设计的依据原则,提出四个层次电磁兼容性设计基本原理框架,并对频谱分析和控制、尖峰干扰控制、分系统隔离度、环境电磁场、系统内布局、电源、端口噪声电平和系统防雷等措施提出要求。本章的分析和设计目标是提高系统自兼容能力,所涉及的内容更适合于导航、通信、无线电定位和测

控等复杂电子设备,并经多个工程实践检验是切实可行的。

第4章:电子设备电磁屏蔽的设计。本章阐述了电磁屏蔽的意义和目的,讨论了电场屏蔽、磁场屏蔽和电磁屏蔽的分析方法,即用静电电场理论和等效电路法分别讨论静电屏蔽和交变电场屏蔽;用磁路方法和磁场方法分析了低频磁场的屏蔽问题;用电磁理论方法分析了金属平板的电磁屏蔽问题及多层电磁屏蔽问题,给出计算非实心型频传效能的工程计算公式及其计算举例;最后介绍了各种常见屏蔽材料的特点及其应用。

第5章:EMI电源滤波器的防护设计。本章内容包括从电源干扰产生的机理和对电子设备所造成的危害入手,分析开关电源产生共差模干扰的机理、定义和开关电源输入阻抗的三种测试方法,特别是可应用于共/差模分离的双电流探头法。EMI滤波器抑制共/差模干扰的机理和插损定义,常用典型电路。EMI滤波器的理论计算方法和工程计算方法。EMI输入滤波器的稳定性问题及改善稳定性的常用阻尼电路及其工程计算方法。电感的磁场基本定律、磁材的特性和分类,共模、差模和整流滤波三种电感的工程计算方法及举例。CISPR17规范中的三种EMI滤波器插损测量方法及存在的实际问题。EMI滤波器的正确选择和使用,三相和单相电路和直流和交流电路的异同,滤波器的安全问题及正确安装。最后阐述了EMI滤波器的发展趋势。

第6章:电子电气设备接地设计。本章从接地基本概念分析接地干扰产生的机理,提出克服共模、差模接地干扰的主要方法,并结合工程实践经验,介绍了接地系统的设计实例和工程上遇到的部分问题的处理方法。本章的设计内容工程上较为严格,更适合于强电和弱电一体化的大型设备中。

第7章:电子电气设备布线和接地设计。本章分析了线间通过电容和电感耦合引起的串扰,分析屏蔽线的磁屏蔽、电屏蔽的作用,地回路干扰的形成等;结合工程设计经验,提出了线型选择、工程布线和布缆方法,对特殊部件电连接器、汇流环及线缆转接箱的设计要求,并分析了工程应用若干布线问题。本章的设计内容和接口电路的电磁兼容性成为电子设备自兼容和满足电磁兼容性指标的重点内容。

第8章:多层印制电路板的电磁兼容设计。现代电子设备的智能化、数字化的迅速发展使得电子设备总体设计、结构和PCB设计方法都发生了很大的改变,特别是数字式电子设备中完全融合到一起的信号完整性和电磁兼容性设计对多层印制电路板设计技术提出了巨大的挑战。本章在全面阐述了多层PCB的设计理念和设计方法的同时也详细地阐述了数字设备中的关键模块,例如电子设备中的接地、连接和搭接、电源、时钟和I/O电路等的具体设计方法和设计步骤。此外,本章还提出了保障电子信息安全的物理层面的,或在编码处理之前的信息安全分层模型及其设计理念。

第9章:静电、静电测量和静电防护。本章阐述了静电的产生机理和性质;三个模拟静电的带电模型;静电的危害;静电的测量以及静电的防护措施等五个方面的问题。

第10章:雷电及电磁脉冲的防护技术。本章从雷电形成的物理过程和基本知识入手,分析了雷电产生的电磁脉冲波形、能量分布特征和直接间接效应,分析了人为产生的各种电磁脉冲的波形和能量分布特征,并将这两类电磁脉冲进行异同对比并由此得出合理的防护措施。在介绍系统防雷工程的组成部分的基础上,进一步阐述接闪、屏蔽、均压、接地等防护原理,功能和实施举例,以及雷电的分区防护概念。还分别详尽介绍了各种防雷器件的原理、性能、使用过程中的问题以及它们之间的连接关系和电路,阐述防雷技术的应用,最后举例介绍了系统防雷工程的具体组成和日本系统防雷的加固工程实例。

第 11 章:电磁兼容性测量及测量标准。本章阐述了电磁兼容性测量的基本概念;介绍了电磁兼容性测量需要的主要仪器、附件和设施的工作原理、性能要求、校准方法及使用中注意事项等;介绍了电磁兼容性认证测量的基本方法,以及在电磁兼容设计中如何使用电磁兼容诊断设备进行电磁兼容性诊断测量;最后给出电磁兼容性测量不确定度分析和国内外有关电磁兼容标准的基本状况。

第 12 章:电磁兼容性故障诊断。本章阐述了故障定义、分类和特点,提出了故障矩阵、故障树排除法、故障检测和分析等一套较完整的故障诊断方法,这些方法突出了理论分析与诊断检测相结合、矩阵分析与可靠性故障树分析相结合、现场诊断与已有电磁兼容性故障案例相结合,大大提高了故障诊断的成功率。本方法适用于研制产品电磁兼容性故障的现场诊断和产品使用过程中的电磁兼容性故障诊断。

本书第 1 章、第 5 章和第 10 章由北京理工大学区健昌教授编写;第 2 章、第 8 章由北京邮电大学吕英华教授编写;第 3 章、第 6 章、第 7 章和第 12 章由中国航天科工集团二院 23 所林守霖研究员编写;第 4 章由北京理工大学孙明云副教授编写;第 9 章由中国航天科技集团 708 所刘利华高工编写;第 11 章由中国航天科工集团二院 203 所冯桂山高工编写。

在这里我们要感谢欧阳荣泰先生在绘图方面给予的帮助。

由于电磁兼容工程涉及的学科和领域非常广泛,而且又是不断发展中的边缘学科,尽管编委会成员竭尽全力,书中仍然难免有疏漏不当甚至错误之处,敬请读者不吝赐教。

编者

2009 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.1.1 电磁兼容性设计的依据	48
1.1 电磁兼容发展简史	1	3.1.2 电磁兼容性设计的主要原则	48
1.2 电磁兼容的主要国际组织和机构	2	3.1.3 电磁兼容性问题的处理和 设计方法	49
1.3 电磁兼容学科和研究对象	3	3.1.4 系统设计的任务	50
1.3.1 电磁脉冲与电磁环境效应	3	3.2 谱域分析和系统间电磁兼容性	51
1.3.2 雷电(Lightning)	5	3.2.1 发射机功率谱函数数学模型	52
1.3.3 强电磁脉冲(EMP)	5	3.2.2 接收机响应谱函数数学模型	53
1.3.4 静电放电(ESD)	6	3.2.3 天线增益函数数学模型	54
1.3.5 开关操作	7	3.2.4 馈线损耗	56
1.3.6 对电气、电子设备或元器件 造成的危害	7	3.3 环境电磁场及安全界限值	57
1.3.7 研究所涉及的领域	7	3.3.1 接收系统的环境电磁场	57
1.4 EMC 的研究方法	8	3.3.2 发射系统的环境电磁场	58
1.4.1 EMC 设计方法的演变	8	3.3.3 电磁波安全界限值	59
1.4.2 EMI 的预测和分析	10	3.4 频谱控制和尖峰脉冲控制	61
1.4.3 EMC 设计的有效性	11	3.4.1 频谱分析与控制	61
1.4.4 EMI 的控制技术	11	3.4.2 尖峰脉冲控制	62
1.4.5 EMC 的仪器与测量技术	12	3.5 电源的电磁兼容性要求	63
第 2 章 电子设备电磁兼容设计原理	14	3.5.1 系统对电源干扰的限制性要求	63
2.1 电子设备电磁兼容设计的内容 及采用的方法	14	3.5.2 一次电源系统特性要求	63
2.1.1 21 世纪的电子信息设备的 电磁兼容	14	3.6 系统内不可控噪声电平	64
2.1.2 保证设备级的电磁兼容性	16	3.6.1 系统地线干扰指标和分配方法	64
2.1.3 保证综合系统和系统级的 电磁兼容性	17	3.6.2 系统地线干扰噪声的测量	66
2.1.4 保证业务级的电磁兼容性	19	3.7 电磁干扰隔离度和布局	67
2.2 常见的电磁干扰源及特性	20	3.7.1 发射机与接收机的隔离度	67
2.2.1 自然界存在的电磁干扰源	20	3.7.2 接收机通道隔离度	67
2.2.2 人为的电磁干扰源	20	3.7.3 系统内其他设备之间的隔离度	68
2.2.3 干扰源的频谱评估	24	3.7.4 装备和电子设备的布局	68
2.3 电磁干扰作用途径及分析方法	27	3.8 接地、布线、屏蔽总体方案	69
2.3.1 辐射干扰	28	3.9 电子、电气系统的防雷措施	70
2.3.2 传导干扰	33	3.9.1 避雷针结构	70
2.4 保证电磁兼容性的方法	38	3.9.2 避雷针引下线和接地	71
2.4.1 在不同等级上保证电磁 兼容性的方法	39	3.9.3 对感应雷的防护	71
2.4.2 减小导线之间的耦合	40	第 4 章 电子设备电磁屏蔽的设计	72
2.4.3 接地	42	4.1 概述	72
2.4.4 屏蔽与滤波	44	4.2 电场屏蔽	73
第 3 章 电子电气系统电磁兼容性 分析和设计	48	4.2.1 静电屏蔽	73
3.1 系统电磁兼容性概述	48	4.2.2 交变电场屏蔽	74
		4.3 磁场屏蔽	77
		4.3.1 静磁屏蔽	77
		4.3.2 低频磁场屏蔽	81
		4.4 电磁屏蔽	83
		4.4.1 电磁辐射干扰源	83
		4.4.2 屏蔽效能的计算	85

4.5 电磁屏蔽材料	98	5.10.1 模块电源 EMI 滤波器向小型化 和功能复合化方向发展	168
4.5.1 屏蔽用金属材料	98	5.10.2 X2Y 平衡式 MLCC 电容 滤波器	170
4.5.2 缝隙屏蔽材料	98	5.10.3 常规连接器向带有滤波或压敏 功能的连接器方向发展	172
4.5.3 薄膜屏蔽材料	99	5.11 简易的共/差模分离方法	174
4.5.4 通风孔屏蔽材料	99	第 6 章 电子电气设备接地设计	179
4.5.5 观察窗屏蔽材料	101	6.1 基本概念	179
4.5.6 引线孔的屏蔽材料	101	6.1.1 接地是电路的组成部分	179
第 5 章 EMI 电源滤波器的防护设计 ..	102	6.1.2 接地建立基准电平	179
5.1 电网的电源干扰	102	6.1.3 地线干扰分析	180
5.2 开关电源的干扰	103	6.2 克服地线干扰的主要方法	181
5.3 噪声源的等效电路	104	6.2.1 克服差模干扰的有效方法	181
5.3.1 三线制输入端的开关电源噪声	104	6.2.2 克服共模干扰的主要方法	183
5.3.2 开关电源输出端噪声	105	6.2.3 地线的天线效应引起的电流	186
5.3.3 二线制输入端的开关电源噪声	107	6.2.4 接地电位差干扰的抑制方法	187
5.3.4 噪声源等效电路的输入阻抗	108	6.2.5 安全接地	188
5.4 EMI 电源滤波器插入损耗的理论 计算方法	114	6.3 接地系统设计实例	189
5.4.1 插入损耗的定义	114	6.3.1 接地系统设计几项主要要求	189
5.4.2 电源滤波器一般常用的 典型电路	115	6.3.2 接地线截面积选择	190
5.4.3 共模插入损耗的推导	116	6.3.3 供电配电箱接地	191
5.4.4 差模插入损耗的推导	117	6.3.4 复杂电子设备的接地	191
5.4.5 理论计算与实测结果	118	6.3.5 供电接地、电子设备接地、 避雷接地的相互关系	192
5.4.6 高频参数的修正	119	6.4 搭接	193
5.5 EMI 电源滤波器插入损耗的工程 计算方法	121	6.4.1 搭接的类型	193
5.5.1 理论计算公式	121	6.4.2 搭接片的设计	193
5.5.2 工程应用	123	6.4.3 搭接面的处理	194
5.5.3 应用步骤	126	6.4.4 搭接技术的一般原则	194
5.5.4 设计举例	126	6.4.5 搭接电阻要求	194
5.6 EMI 输入滤波器的稳定性问题	130	6.5 接地综合性问题分析	195
5.6.1 并联阻尼滤波器	131	6.5.1 接地平面电位的平坦度	195
5.7 EMI 滤波器中的滤波电感	133	6.5.2 地线汇总点的确定	195
5.7.1 共模扼流圈	136	6.5.3 地面装备(设备)接地电阻	196
5.7.2 差模扼流圈	143	6.5.4 军用装备和民用设备接地 要求的差别	197
5.7.3 整流滤波电感	153	6.5.5 高压设备接地和数字设备 防静电接地的特殊要求	198
5.8 EMI 滤波器标准和测量方法	156	第 7 章 电子电气设备的布线和 接续设计	199
5.8.1 EMI 滤波器的标准	156	7.1 线间串扰分析	199
5.8.2 插入损耗的测量方法	157	7.1.1 电容耦合产生的干扰	199
5.8.3 EMI 电源滤波器实际的输入/ 输出负载	160	7.1.2 电感耦合产生的干扰	201
5.9 EMI 滤波器的正确选择和使用	161	7.1.3 减小线间耦合的一种方法	202
5.9.1 具体电路分析	162	7.2 屏蔽线的磁屏蔽和电磁屏蔽作用 及地回路的形成	204
5.9.2 额定电流与环境温度	164		
5.9.3 耐压、泄漏电流与安全	165		
5.9.4 正确安装方法	166		
5.10 EMI 滤波器的发展趋势	167		

7.2.1 屏蔽层的磁屏蔽	204	8.4.1 概述	247
7.2.2 地回路干扰的形成	205	8.4.2 时钟电路设计方法	248
7.2.3 电磁辐射和同轴电缆屏蔽	206	8.4.3 时钟电路的电磁兼容设计举例	255
7.3 电子设备常用线型	209	8.4.4 时钟电路印制线条的布线方法	257
7.3.1 屏蔽线	209	8.4.5 减小时钟电路辐射的方法	260
7.3.2 双绞线	210	8.4.6 时钟电路引起的串音、保护 线的安排	262
7.3.3 同轴电缆	210	8.4.7 时钟线条终端方法	264
7.4 工程上布线、布缆方法	211	8.5 I/O 电路及背板和连接器的设计	267
7.5 接续设计	212	8.5.1 连接器设计的基本概念	267
7.5.1 滑动连接装置	212	8.5.2 I/O 电路、背板和连接器设计的 一般原理	268
7.5.2 电连接器应用	213	8.5.3 印制电路板到背板的连接设计	276
7.5.3 转接箱(信号分配器)接续设计	213	8.5.4 插板到插槽的阻抗控制	278
7.6 布线电磁兼容性工程应用和分析	214	8.5.5 I/O 电路与背板和连接器 设计的经验方法	279
7.6.1 电缆对中辐射发射 RE102 指标的影响	214	8.5.6 多层印制电路板电磁兼容 设计的理论方法	283
7.6.2 电缆满足 GJB151A 标准中 CS114、CS115、CS116 指标的 电磁兼容性设计	215	第 9 章 静电、静电测量和静电防护	288
7.6.3 互连电缆对电子设备间电磁干扰 隔离度的影响	217	9.1 静电的产生	288
7.6.4 电缆屏蔽层的终端连接法	217	9.1.1 静电产生的机理	288
7.6.5 采用印制母板布线替代 电子设备布线	218	9.1.2 静电产生方式	289
第 8 章 高速印制电路板的电磁 兼容设计	220	9.1.3 静电的屏蔽性	290
8.1 电子信息设备电磁兼容性设计 与信息安全	220	9.1.4 电子产品敏感特性	291
8.1.1 概述	220	9.2 静电放电(ESD)试验模型	293
8.1.2 电子设备电磁兼容设计思想	221	9.2.1 人体模型	293
8.2 高速印制电路板设计基础	224	9.2.2 带电器件模型	296
8.2.1 电磁兼容设计要考虑的带宽 和等效电路	226	9.2.3 电场感应模型	297
8.2.2 印制线条及电路的高频 参数计算	229	9.3 危害	298
8.2.3 决定多层印制电路板的 布线安排	232	9.3.1 引起爆炸和火灾	298
8.2.4 高速印制电路板的接地设计	236	9.3.2 给人以电击	298
8.2.5 高速电路板布线的其他方法	237	9.3.3 妨碍生产	299
8.3 数字电路的电容设计	239	9.3.4 对电子产品的影响	299
8.3.1 开关电路供电的特点和 解决方案	240	9.4 测量	300
8.3.2 电容器的自谐振频率	240	9.4.1 电子元器件静电放电(ESD) 敏感度测量	300
8.3.3 数字电路电源系统电容的 设计方法	242	9.4.2 电子设备静电放电(ESD) 敏感度试验	301
8.3.4 数字电路电源系统设计 遇到的实际问题	243	9.5 静电放电(ESD)的防护	302
8.4 时钟电路的电磁兼容设计	247	9.5.1 一般措施	302
		9.5.2 仪器和设备的防静电 放电(ESD)措施	306
		9.5.3 软件防静电放电(ESD)措施	312
		第 10 章 雷电及电磁脉冲的防护技术	313
		10.1 雷电基础知识	313
		10.1.1 雷电形成的物理过程	313
		10.1.2 雷电活动规律	317

10.2 雷电及电磁脉冲的物理特性	319	11.3.5 辐射诊断测量注意事项	429
10.2.1 雷电流波形及一般物理特性	319	11.4 电磁兼容性基本测量方法	429
10.2.2 雷电电磁脉冲的频谱分析	321	11.4.1 电磁辐射发射测量系统(RE) (电磁骚扰或辐射骚扰)	430
10.2.3 电磁脉冲的波形和频谱	323	11.4.2 电磁辐射敏感度测量系统(RS) (电磁抗扰度)	430
10.2.4 雷电及电磁脉冲的传播途径	326	11.4.3 传导发射测量系统(CE) (传导骚扰)	431
10.3 雷电电磁脉冲的物理效应和 电磁效应	328	11.4.4 传导敏感度测量系统(CS)	432
10.3.1 电磁脉冲对器件或系统(设备) 的电磁效应	328	11.5 电磁兼容性测量仪器和附件的校准	435
10.3.2 电磁脉冲对地下长传输电缆的 影响	332	11.5.1 电磁干扰测量系统的校准	436
10.3.3 对供电线的影响	335	11.5.2 天线的校准	437
10.4 雷电和电磁脉冲的防护原理	335	11.5.3 电流探头传输阻抗校准方法	442
10.4.1 接闪	336	11.5.4 电流注入探头插入损耗校准方法	443
10.4.2 屏蔽	337	11.5.5 电源阻抗稳定网络校准	443
10.4.3 均压(等电位)	337	11.6 电磁兼容性测量不确定度分析	444
10.4.4 接地和接地电阻	338	11.6.1 不确定度分析的基本概念	444
10.5 过压保护原理及其器件	342	11.6.2 EMI 测量不确定度分析	446
10.5.1 过压保护原理	342	11.6.3 电磁敏感度测量不确定度分析	448
10.5.2 过压保护器件(SPD)	343	11.7 电磁兼容性标准概况	448
10.6 雷电、电磁脉冲防护技术的应用	360	第12章 电磁兼容性故障诊断	459
10.6.1 关于防雷规范的讨论	360	12.1 概述	459
10.6.2 接闪器	362	12.2 电磁兼容性故障矩阵	460
10.6.3 地网	367	12.2.1 故障矩阵原理	461
10.6.4 防雷器总体要求	369	12.2.2 不同分系统故障矩阵 元素的分析	462
10.6.5 电源防雷器的要求和安装	370	12.2.3 电磁兼容性故障矩阵的 综合分析	465
10.6.6 信号防雷器要求	375	12.3 电磁兼容性故障树——排除法	467
10.6.7 防护技术应用	378	12.3.1 故障树建立和分析的一般方法	467
第11章 电磁兼容性测量及测量标准	384	12.3.2 电磁兼容性故障树	469
11.1 电磁兼容性测量的基本概念	384	12.3.3 故障机理的排除法	470
11.1.1 电磁干扰形成原因	384	12.4 电磁兼容性故障监测与干扰识别	471
11.1.2 电磁辐射的基本概念	385	12.4.1 潜在故障监测和设计改进	471
11.1.3 几种电磁兼容测量量纲及 换算关系	387	12.4.2 显性故障的监测和分析	476
11.2 电磁兼容性测量需要的 主要仪器和设施	389	12.4.3 电磁干扰识别	480
11.2.1 接收设备	389	12.5 电磁兼容性故障相似类比法和 故障案例	484
11.2.2 信号发生器	398	12.5.1 故障案例的收集及案例内容	485
11.2.3 功率放大器	402	12.5.2 故障案例的录入和检索	486
11.2.4 使用电子测量仪器注意事项	404	12.5.3 专家系统故障诊断	487
11.2.5 电磁兼容性测量辅助设备	406	12.6 电磁兼容性故障诊断综述	487
11.2.6 电磁兼容性测量设施	415	附录	489
11.3 电磁兼容性性能预测试	420	附录A 欧盟发布的19条安全指令	489
11.3.1 电磁干扰产生的根源	421	附录B 部分电磁兼容国家标准	489
11.3.2 干扰信号的频谱	424	附录C 部分电磁兼容国家军用标准	494
11.3.3 电磁兼容性性能预测试	426	参考文献	495
11.3.4 电磁干扰诊断方法举例	427		

第 1 章 绪 论

当代以半导体工业为基础和支柱的微电子技术,它的迅速发展和应用已渗透到社会生活的各个领域,特别是通信领域近期发展之快和变化之大往往超出人们的预料。最为明显的几个特征是从全球移动卫星系统到无线局域网的出现,无线技术正向通信的各个方面渗透,Internet 和 WWW 网络继续保持指数的增长势头,并产生对高速公众数据网的强烈需求。但是,广泛应用上述微电子技术的设备,它的安全性、可靠性和电磁兼容性实在令人担忧,因为超大规模集成电路和公众数据网络的不断发展、导致了对人为的自然的过电压或过电流冲击更加敏感,几乎成指数增长的趋势。因此,联合国确定电磁环境污染是继环境中的空气、水质、噪声等污染之后的第四大环境污染。

我们清楚地认识到电磁波既是有益于社会发展的信息载体和能量流载体,又是潜在的环境污染源。其危害效应已受到我国及国际环保领域的高度重视。所以,既要把电磁能作为一种宝贵资源加以充分利用,又要加强管理将负面效应降到最低,进而发展成为电磁环境效应领域。

本书所指的电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)对于设备或系统的性能指标来说,应为“电磁兼容性”,但作为一门学科来说,应为“电磁兼容”。

它的确切定义按国家军用标准 GJB72—1985《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》为:“设备(分系统、系统)在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。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或遭受不允许的降级;它也不会使同一电磁环境中其他设备(分系统、系统),因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。”

1.1 电磁兼容发展简史

电磁兼容的研究工作可追溯到 19 世纪,希维赛德 1881 年写的“论干扰”一文,是重要的早期文献。此后 1887 年柏林电气协会成立了全部干扰问题委员会,1889 年英国邮电部门研究了通信干扰问题。到 20 世纪 20 年代以后各工业先进国家都日益重视电磁兼容的研究,纷纷成立相关的国际组织;40 年代为了解决飞机通信系统受到电磁干扰造成的飞机事故,开始较系统地进行电磁兼容技术的研究,特别是美国 1945 年颁布了一系列电磁兼容军标和设计规范,使电磁兼容技术进入新的阶段;60 年代起,美、苏、英等国家军事部门都先后建立较完善的电磁兼容实验室、电磁兼容分析中心,制订各种标准规范,研究各类武器系统在恶劣环境下的电磁干扰问题;到了 80 年代,国外电磁兼容标准规范从军事转向民用发展,为满足规范要求工业发达国家投入了大量人力物力,开辟实验基地,建设屏蔽室,研究各种干扰测试方法和抑制措施,形成电磁兼容发展的高潮。

我国电磁兼容工作起步较晚,20 世纪 70 年代随着四个现代化实施才逐渐发展起来。

1.2 电磁兼容的主要国际组织和机构

1. IEC(国际电工委员会)

IEC 主要是各国民间制造商(团体)组成的关于电气标准规范的国际组织,现在组成了 TC(技术委员会),下设 78 个委员会,还有 CISPR(国际无线电干扰特别委员会)等四个特别委员会,与 EMC 关系特别密切的是 TC-77 和 CISPR,其他各委员会也接受与 EMC 有关各课题的研究。

2. TC-77(电气设备(含网络)间的电磁兼容委员会)

各国 TC 都在 EMC 的组织下积极开展活动,寻找共同点,制定有关规范,并且针对各个 TC 都不管的问题设立了 WG(工作组)及 Sub Comm(分委员会)。此外,美国和英国的 TC-77 和 CISPR 还有下属机构。

3. CISPR(国际无线电干扰特别委员会)

CISPR 也是 IEC 的下属机构,但其活动方式比 TC 更具独立性。它是为了研究,防护广播接收、通信等对其他电气设备的干扰而设立的特别机构。它成立于 1934 年,主要是研究统一的测试方法,并根据各种电气设备提出电磁干扰限值的建议。CISPR 有七个分委员会,其中 G 分会是 1986 年 3 月新设立的机构,它受理包括通信设备在内的各种信息技术设备所带来的电磁干扰和抗干扰性等问题的研究。

4. CCITT(国际电报电话咨询委员会)

这个委员会的第五及第六研究组经常研究与 EMC 有关的课题,并定期召开年会。目前第五研究组审议中的主要课题为:①关于人体安全的过压过流问题;②通信设备的过压过流以及抗耐力的标准化问题;③感应杂波问题;④接地问题。

5. TC-65(工业过程测量和控制技术委员会)

TC-65 和 TC-77 对 EMC 的研究都很有成效。这些技术委员会在进行 EMC 研究和制订标准方面均与 CISPR 协调一致。最近 TC-65 就传导影响及磁影响将电磁环境分为以下几个等级:①完善防护型环境;②防护型环境;③有代表性的工业环境;④严重恶劣的工业环境;⑤需要进行分析的专门情况。

6. IWCS(国际电线电缆学术讨论会)

有 20 多个国家参加这个组织(主要在美国进行活动),研究线缆构成、材料、规格、试验、施工、维护及制造等有关课题,对防护各种电磁环境的有害影响所采用的特殊线缆结构也是其中的一个重要课题。

7. CCIR(国际无线电咨询委员会)

该委员会成立于 1929 年,是一个专门的国际联合机构 ITU(国际电信联盟)的常设咨询委员会,其任务是研究无线电技术的应用问题,并且提出建议。

8. URSI(国际无线电科学联盟)

该委员会成立于 1919 年,是 ICSU(国际学术联合会)的组织机构,进行无线电科学的学术研究,总部设在比利时的布鲁塞尔。目前有 A—J 等九个委员会和一个“时域波形测试”联合工作组。URSI 平均三年左右召开一次全会。

9. IEEE-EMC(电气电子工程师学会电磁兼容专业委员会)

美国无线电工程师学会(IRE)于 1957 年成立了射频干扰专业学组,1959 年召开了学术讨论会并改名为电磁兼容专业学组。1978 年电磁兼容学组改为电磁兼容专业委员会。自 1959

年以来,每年均召开电磁兼容学术讨论会。该专业委员会创办有电磁兼容学报,其宗旨包括:
①维护技术标准;②即时发表权威性文章;③介绍学会所关心的各个领域的新发展。

1.3 电磁兼容学科和研究对象

电磁兼容学科包含的内容十分广泛,几乎包含所有的现代工业,如能源、通信、交通、金融、计算机、航空、航天、军工、医疗等。

电磁兼容学科涉及的理论基础包括数学、电磁场理论、天线与电波传播、电路理论、信号分析、通信理论、材料科学、生物医学等,所以电磁兼容学科是一门尖端的综合性学科,同时又紧密地与工业生产和质量控制相关。

众所周知,构成电磁干扰必须同时具备的三个要素:电磁干扰源、对干扰源敏感的受扰器和传递媒体。电磁兼容要研究的对象正是它们的特性、边界条件和有效的抑制办法。

无论是人为的或自然的电磁干扰源,可以按它们构成威胁的程度划分为四类,依次是:雷电、强电磁脉冲、静电放电和开关操作。其电压、电流和时域特性见表 1.1。

表 1.1 电磁干扰电压、电流和时域的特性

瞬变的来源		电 压	电 流	上 升 时 间	延 续 时 间
雷电	a	500kV/m	200kA	$<1.5\mu\text{s}$	$20\mu\text{s}$
	b	6kV/m	3kA	$<8\mu\text{s}$	
核爆炸产生的电磁脉冲	a	100kV/m	10kA	10ns	150ns
	b	1kV	$>10\text{A}$	20ns	$1\mu\text{s}$
静电放电	a	40kV	80A	$1\sim 5\text{ns}$	$<100\text{ns}$
	b	$1\sim 5\text{kV}$	$>10\text{a}$	10ns	$>100\text{ns}$
开关动作	a	$<2500\text{V}$	200A	$<10\mu\text{s}$	$>40\mu\text{s}$
	b	$<600\text{V}$	$<500\text{A}$	$<50\mu\text{s}$	$>10\mu\text{s}$

注:a是直接造成的最坏瞬变状态,b是间接的瞬变状态。

1.3.1 电磁脉冲与电磁环境效应

在高科技条件下,空间电磁环境日益复杂,除雷电和静电等自然灾害外,还有通信、广播、雷达、电子战设备等辐射源和定向能电磁脉冲(EMP)武器、高功率微波(HPM)弹等人为电磁辐射源,尤其是静电放电和高功率微波等快速上升沿脉冲电流形成的电磁脉冲场,对设备安全甚至生存能力构成严重危害。

电磁环境效应(Electromagnetic Environment Effects),GJB72A—2002 定义为:电磁环境对电气电子系统、设备、装置的运行能力的影响。它涵盖所有的电磁学科,包括电磁兼容性,电磁干扰,电磁易损性,电磁脉冲,电子对抗、电磁辐射对武器装备和易挥发物质的危害,以及雷电和沉积静电(P-static)等自然效应。一般电磁环境的构成因素如图 1.1 所示。

目前国内外研究的现状与趋势简述如下。

1. 电磁脉冲源已实用化

美、前苏联早在 20 世纪 60 年代就开始研究武器系统受电磁脉冲干扰的问题,美从射频对军械的危害(HERO)研究逐渐扩展为现代武器装备的电磁环境效应研究和相应规范 MIL—STD—464A,无论从概念到研究范围都在不断地更新和扩展。

美、俄已研制的 GW 级 UWB(超带宽)干扰机现已小型化,可用常规兵器投掷到敌方阵地,不仅可干扰或损伤敌方的 C³I 系统,而且直接影响精确制导武器和信息化单兵作战能力。

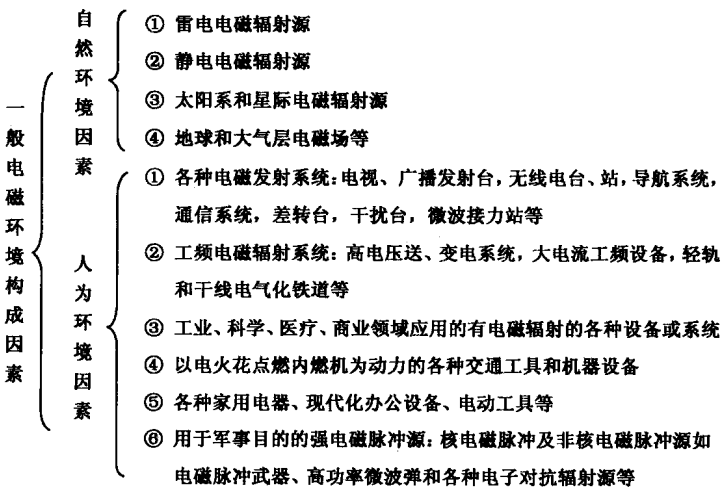


图 1.1 一般电磁环境的构成因素

事实上,1990 年—1991 年的海湾战争中已由美 E-8 联合星飞机携带使用过。

2. 电磁脉冲模拟技术和防护技术不断提高和深入

国外核电磁脉冲(NEMP)可产生高达 $1 \times 10^2 \text{ kV/m}$ 电场强度的核电磁脉冲环境、脉冲上升时间由 10ns 缩短到 1.8~2.8ns 并对 ESD 辐射场理论建模、硬软件等展开研究。

国外十分重视武器装备的防护加固技术研究,并针对电路中敏感电子器件因电磁作用的失效模式、电磁损伤机理和能量耦合方式进行深入研究,同时颁布相关的军用标准。俄罗斯在 1993 年就完成了电磁脉冲对微电子电路的效应实验和防护技术研究。最近几年对国际电工委员会标准 IEC61000-4-2 规定的试验方法和平台已做过多次修改和补充。

我国从 20 世纪 80 年代开始研究电磁兼容性和电磁辐射对武器装备的危害性,在静电、雷电和核电磁脉冲防护研究方面做了大量工作,在某些方面已处于国际先进水平,但在强电磁场环境模拟及其防护技术研究方面、整体水平方面与发达国家相比仍有较大差距。我军最新的电磁环境效应规范是 GJB 1389A-2005。

3. 电磁脉冲的主要参数和环境效应

表 1.2 表示三种电磁脉冲源的参数对比;表 1.3 表示电磁脉冲的环境效应。

表 1.2 三种电磁脉冲源的参数对比

类 别		HPM	UWB	HEMP
天线处峰值功率		100MW~20GW	GW~20GW	50000TW
脉冲半高宽		$<10\text{ns} \sim <1\mu\text{s}$	$<10\text{ns}$	$\sim 20\text{ns}$
上升时间		10~20ns	$<1\text{ns}$	1~5ns
脉冲能量		100J~20kJ	5J~500J	10^6GJ
频谱带宽		500MHz~10GHz	100MHz~50GHz	0~200MHz
不同距离的 功率密度	100m	$1\text{W/m}^2 \sim 200\text{MW/m}^2$	$2\text{W/m}^2 \sim 100\text{W/m}^2$	600W/m^2
	1km	$10\text{mW/m}^2 \sim 2\text{MW/m}^2$		600W/m^2
	10km	$0.1\text{mW/m}^2 \sim 200\text{kW/m}^2$		600W/m^2
不同距离的 峰值电场	100m	$20\text{kV/m} \sim 300\text{kV/m}$	$4\text{kV/m} \sim 20\text{kV/m}$	50kV/m
	1km	$2\text{kV/m} \sim 30\text{kV/m}$		50kV/m
	10km	$0.2\text{kV/m} \sim 3\text{kV/m}$		50kV/m
作用距离		几 km 到几十 km	$<100\text{m}$	$10^2 \sim 10^2 \text{ km}$
辐射方法		天线	天线或有规律爆炸	核爆炸

表 1.3 电磁脉冲的环境效应

参考距离	功率密度	效 应
10km	0.1W~10W/m ²	对雷达和通信设备产生强干扰,设备不能正常工作
10km~1km	0.1kW~10kW/m ²	通信、雷达、导航等系统的微电子设备失效或烧毁
1km	0.1MW~1MW/m ²	壳体内部产生瞬态电磁场,并进入壳体内部电路产生感应电压,出现功能紊乱、误码、逻辑混乱直至永久失效
100m	10 MW~1MW/m ²	强场作用,引起许多非线性感应,产生微观力学效应或非常吸收,可在短时间内毁坏目标

4. 电磁脉冲能量的机理

它可概括为以下四个方面:

(1) 热效应。静电放电和高功率电磁脉冲产生的热效应一般在 ns 或 μ s 级完成,是一种绝热过程,可引起易燃易爆气体或火工品爆炸,可使系统中微电子器件和敏感电路因过热而性能变坏或失效。

(2) 电磁辐射场作用。静电放电和高功率微波的电磁辐射对信息化设备所造成的电磁干扰会使设备产生误动作或功能失效;强电磁脉冲及其浪涌效应还可造成设备的损伤、完全失效,也可形成累积效应。

(3) 静电场效应。ESD-EMP 产生的强电场不仅可使 MOS 管的栅氧化层击穿或金属化线间的介质击穿,而且可形成潜在性损伤,给系统和敏感电路的可靠性造成影响。

(4) 磁效应。静电放电和雷闪引起的强电流可产生强磁场,它可直接耦合到系统内部,干扰电子设备的正常工作。

1.3.2 雷电 (Lightning)

雷电是一种大气物理现象,它与实验室研究的物理现象不同,不可能通过各种人为控制的方法找出确切无误的规律,只能用概率的观点去考虑。

雷电或更确切地说是伴随雷电产生的雷电电磁脉冲,会对电气、电子设备造成严重威胁。雷电电磁脉冲是最为严重的自然电磁干扰源。闪电放电脉冲的陡度大、峰值电流大、电场强、频谱宽(从 100Hz~100MHz),因此无论是天线、架空电网、外露的电线、电缆、埋地电缆或裸露金属体等都会感应强大的感应过电压、过电流。若它们被引入电气、电子设备将会产生破坏性的后果。这种由感应方式而非直接方式的雷击称做感应雷,由于感应雷发生的概率远远高于直接雷,因此,防感应雷是防雷研究的重中之重。

1.3.3 强电磁脉冲 (EMP)

一般讲强电磁脉冲是指两种极强的人工电磁干扰源:核电磁脉冲(NEMP)或高空核电磁脉冲(HEMP)和非核高能微波电磁脉冲(HPM),它们都是用极强的电磁辐射对人体特别是对电气或电子系统、设备进行干扰破坏,使之失效、瘫痪,所以是现代战争的电磁武器。据了解高能微波武器已达到的技术指标是:频率 1~100GHz,脉冲宽度 0.1~1 μ s,定向性<30°,峰值功率 10~100GW,总输出能量约 100kJ,直接破坏距离 300m~1km。据日军刊物报道,战略型电磁脉冲能量可达到核弹释放总量的 40%,电磁脉冲的场强在 50kV/m 数量级上,峰值场强可达 100kV/m,频谱几乎覆盖 1~30kHz 至 30~300MHz 频段,电磁脉冲的上升时间 10ns 以内,后沿略缓,但不超过几百 ns,它的影响范围很大,方圆可达数百乃至数十万米,在其作用范围内

的架空输电线好比是个巨大的接收天线,会产生很高的感应电压,其峰值可达 10^3 kV 量级。

根据目前我国电力系统绝缘水平的分析,对 EMP 感应电压构成威胁的主要是 10kV 以下的配电系统。如选取适当的相关参数,可计算架空线终端开路的典型 EMP 感应波形如图 1.2 所示。

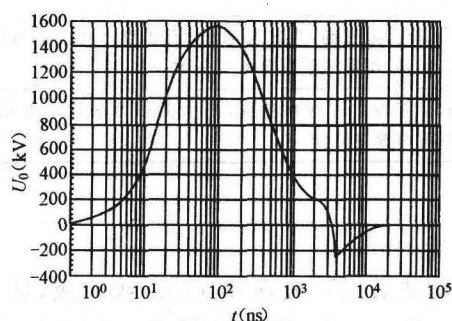


图 1.2 EMP 在架空线上感应的典型波形图

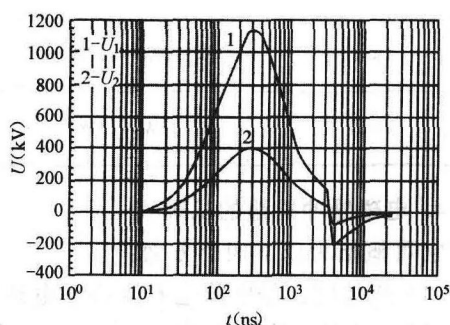


图 1.3 变压器输入端电容对 EMP 感应波形的影响

图 1.2 中脉冲峰值 ≥ 1500 kV, 平均前沿陡度约 15 kV/ns, 此典型波形可近似用双指数函数表示为

$$U_0 = 1.85 \times 10^3 (e^{-1.15 \times 10^6 t} - e^{-3.2 \times 10^7 t}) \quad (\text{kV}) \quad (1.1)$$

某 10kV 架空线终端接 10/0.4kV、300kVA 电力变压器, 由于变压器输入端电容的影响, 脉冲波峰值和前后沿陡度均有所下降, 如图 1.3 所示。其中, 曲线 1 为变压器输入端波形, 曲线 2 为变压器输出端开路的波形。若考虑到城市建筑物的屏蔽作用, 实际的 EMP 感应电压比上述理论值要低些。

1.3.4 静电放电(ESD)

实际上静电放电是人或设备在低湿度环境中运动(一般与化纤地毯或化纤衣鞋有关)很容易产生的一种物理现象, 即在运动的过程中吸取和释放静电。内有运动部件的静止设备也同样能引起静电放电, 例如复印机和打印机在送纸过程中会产生静电放电。

ESD 不同于周期性的脉冲是一种非周期性的放电脉冲, 它的频谱能量分布是连续性的, 所以是一种宽带干扰源, 不仅能干扰宽带设备甚至能干扰窄带设备。

抑制 ESD 的有效办法是防止它直达被保护的器件, 防止之后就转变为辐射加固的问题了。对于同一个需保护的环路来说, 为了减小 ESD 在环路中产生的干扰电压, 它所需的屏蔽效率要比一般减小辐射电磁场干扰电压所需的屏蔽效率要高 $10 \sim 100$ 倍或提高 $20 \sim 40$ dB。

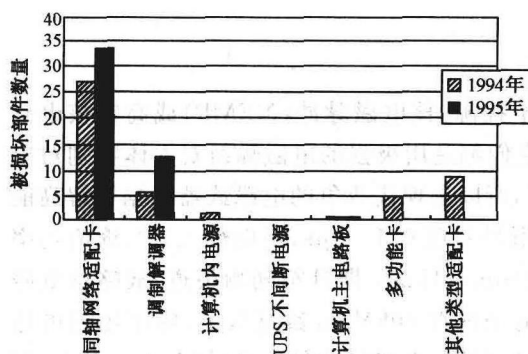


图 1.4 计算机通信系统遭雷击损坏的统计

雷电产生的静电感应会造成区域性的灾害, 当静电感应形成的感应过电压波, 沿着输电线、信号线窜入配电设备、窜入信号线终端设备, 特别是对计算机通信接口的损坏往往直接导致整个通信网络系统的瘫痪。统计发现, 分布在同一建筑物内或相邻建筑物内的计算机局域通信网络, 遭受的损坏最为严重, 其中又以计算机同轴网络适配卡的损坏最多。在计算机远程通信中, 调制解调器的损坏也较严重, 这是由于调制解调器大多与市话线相连的缘故, 如图 1.4 所示。

1.3.5 开关操作

由于开关的通或断引起电压或电流急剧变化产生瞬态干扰。其中的电子开关虽然不如机械开关那样易于产生火花放电,但电子开关的速度快,导致电流迅速变化的干扰就不可避免。

若令电流波的上升时间为 τ 、传输此电流波所需占用的频带宽度为 B ,则它们之间存在如下关系

$$\tau \cdot B = 0.5 \sim 1.0 \quad (1.2)$$

可见,波形上升的时间越短,占有的频带越宽,含有的高次谐波越丰富。

为了从时域上区分因开关操作产生的干扰性质,通常将瞬变时间 $>8.4\text{ms}$ 的干扰定义为浪涌电压。如瞬变电压的波形近似正弦波或按指数规律衰减的一般和高阻抗有关,其电压变化范围很宽,小者不过数毫伏,大者甚至可达千、万伏;如浪涌电压的波形近似方波或按指数规律衰减的一般和低阻抗内阻有关。它的浪涌电压幅度99%不超过正常工作电压的三倍,90%不会超过正常工作的两倍,通常浪涌电压按二倍工作电压计算。

1.3.6 对电气、电子设备或元器件造成的危害

上述各类电磁干扰对电气、电子设备或系统,特别是对含有半导体器件的设备或系统会产生严重的破坏作用。

半导体器件一般损伤阈值为 $10^{-5} \sim 10^{-2}\text{J}/\text{cm}^2$,易损器件则降为 $0.1 \sim 1\mu\text{J}/\text{cm}^2$,若不损坏器件,只引起瞬时失效或干扰,其损伤阈值还要低2~3个数量级。

上述损坏效应归纳起来主要有以下几种情况。

(1) 高压击穿:当器件接收电磁能量后可转化为大电流,在高阻处也可转化为高电压,结果可引起接点、部件或回路间的电击穿,导致器件的损坏或瞬时失效。例如脉宽 $0.1\mu\text{s}$ 电流幅值为1A的电流脉冲,可在接点间电容为1pF处的接点产生100kV电压,该接点被击穿后还会产生数十万赫[兹]的衰减正弦振荡,并辐射出电磁波。

(2) 器件烧毁或瞬变干扰:除高压击穿外,器件因瞬变电压造成短路损坏的原因一般都归结于功率过大而烧毁或PN结的电压过高而击穿,无论是集成电路(IC)、存储器还是晶体管、二极管、可控硅等都是同样的。大多数半导体器件的最低损坏的有效功率为 $1\mu\text{s}$ 、10W或 $10\mu\text{J}$,一些敏感器件为 $1\mu\text{s}$ 、1W或 $1\mu\text{J}$ 。

(3) 电涌冲击:对有金属屏蔽的电子设备,即使壳体外的微波能量不能直接辐射到设备内部,但是在金属屏蔽壳体上感应的脉冲大电流,像浪涌一样在壳体上流动,壳体上的缝隙、孔洞、外露引线一旦将一部分浪涌电流引入壳内设备,就足以使内部的敏感器件损坏。

1.3.7 研究所涉及的领域

从目前收集到的资料,可大致将电磁兼容性所涉及的领域归纳如下:

- (1) 电磁场与传输线(耦合与串扰);
- (2) 电磁脉冲;
- (3) 强电干扰与静电放电;
- (4) 雷电;
- (5) 电磁兼容性测量;
- (6) 电磁兼容性标准、规范;