



北京市高等教育精品教材立项项目

电磁兼容概论

何金良 编著



科学出版社
www.sciencep.com

北京市高等教育精品教材立项项目

电磁兼容概论

何金良 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

电磁兼容是确保电气及电子系统安全可靠工作的关键技术,在科学研究、设备开发、电路板及微电子设计、解决实际工程问题等方面都具有非常重要的作用。本书着重阐明电磁兼容的基本概念、基本方法及相关技术,同时紧密联系工程实际,反映了电磁兼容领域的最新研究成果。全书共分12章,内容包括电磁骚扰源及传播特性,防护电磁干扰的电磁屏蔽、接地与搭接、滤波、隔离与抑制等技术,电磁兼容性预测原理及主要方法,印制电路板的电磁兼容设计,电磁兼容测试技术及测试方法等。

本书可作为高等院校工科电类和机电类专业研究生、高年级本科生相关课程的教材及教学参考书,也可作为相关工程技术设计人员的专业培训教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容概论/何金良编著. —北京:科学出版社,2010.10
(北京市高等教育精品教材立项项目)
ISBN 978-7-03-029113-4

I. ①电… II. ①何… III. ①电磁兼容性-高等学校-教材 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 189602 号

责任编辑:余 江 / 责任校对:李 影
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年10月第一次印刷 印张:24 3/4

印数:1—3 000 字数:608 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当前人类的生存环境已具有浓厚的电磁环境内涵。一方面,电力网络、用电设备及系统产生的电磁骚扰越来越严重,设备所处电磁环境越来越复杂;另一方面,先进的电子设备的抗干扰能力越来越弱,同时电气及电子系统也越来越复杂。在这种复杂的电磁环境中,如何减少相互间的电磁干扰,使各种设备正常运行,是一个亟待解决的问题。另外,恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响。电磁兼容正是为解决这类问题而迅速发展起来的一门新兴学科。

电磁兼容是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰的能力,研究在有限的空间、时间和频谱资源条件下,各种用电设备(分系统、系统,广义的还包括生物体)可以共存并不致引起降级的一门学科。电磁兼容涉及的频率范围宽达 0~400GHz,研究对象除传统设施外,涉及芯片级,直到各型舰船、航天飞机、洲际导弹,甚至整个地球的电磁环境。电磁兼容研究涉及许多方面,如计算机安全、电信设备、无线设备、工业控制设备、自动化设备、机器人、移动通信设备、航空航天飞机、舰船、武器系统及测量设备的电磁干扰问题,各种线缆的辐射和控制,高压输电线路及交流电气铁道的电磁影响,电磁场生物效应,地震电磁现象等。

许多工业发达国家自 1996 年 1 月 1 日起规定所有电子设备都要经过电磁兼容性认证,否则将禁止在市场销售。我国电磁兼容性认证管理办法已于 1999 年 10 月颁布,从 2003 年 8 月起对电子设备实行电磁兼容强制性认证,简称 3C 认证。3C 认证是中国国家强制性产品认证(China Compulsory Certification)的简称,实际上是将 CCEE(中国电子电工产品安全认证)、CCIB(中国进口电子产品安全认证)、EMC(电磁兼容性认证)三证合一。电磁兼容测试已成为电子设备研发和生产过程中一个不可或缺的重要环节。

从国际发展来看,电磁兼容技术是工科电类和机电类专业研究生及高年级本科生在科学研究、产品开发、电路及微电子电路设计等方面必须掌握的基本理论知识及实际技能。本书的编写目的是让工科研究生全面系统地学习电磁兼容技术、进行电磁兼容的科学训练,全面系统地掌握电磁兼容的理论基础,为进一步开展电磁兼容领域的科学研究、从事设备开发及电路板和微电子的设计、解决实际工程中的电磁兼容问题等方面打下坚实的理论和技能的基础,使其能够熟练运用所学的知识进行电磁兼容分析和电子设备的电磁兼容性设计。

本书是编者结合其 2002 年开始在清华大学设置的研究生课程“电磁兼容”的建设而编写的,主要内容摘引自国内外的书籍、文献及资料,按照课程体系重新分类编写,以供学生学习参考。全书共分为 12 章,第 1 章概括电磁兼容的基本内涵;第 2 章介绍电磁骚扰源及特性;第 3 章讨论电磁骚扰传播机理;第 4~8 章主要介绍电磁干扰防护的主要措施,第 4 章介绍防范空间电磁干扰的电磁屏蔽技术,第 5 章介绍接地与搭接技术,第 6 章介绍电磁干扰滤波技术,第 7 章介绍电磁干扰的隔离与抑制技术,第 8 章讨论信号传输回路的干扰控制技术;第 9 章分析印制电路板的电磁兼容设计技术;第 10 章介绍电磁兼容性预测的基本原理和基本方法;第 11、12 章介绍电磁兼容测试的主要设备、场地和测试方法。编者希望本书尽可能全面地反映电磁兼容的基础理论和应用技术,涵盖电磁兼容技术方面的最新研究进展,但编写时难免挂一

漏万,希望读者多提宝贵意见和建议。主要参考的国内外相关文献已列入参考文献中,编者对相关文献的作者表示诚挚的谢意,但参考文献也难免有疏漏,敬请谅解。

本书由清华大学电机工程与应用电子技术系何金良教授主编,袁志勇博士参与了第 11、12 章的编写和整理,邹军副教授参与了第 10 章的编写。在本书的编写过程中,清华大学电机工程与应用电子技术系电磁环境研究室的全体同仁提出了很多宝贵意见。另外,还有很多业界同仁为本书的编写提供了资料及建议,在此一并致以诚挚的谢意。

编 者
2010 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 电磁兼容导论	1
1.1 电磁兼容名词术语及单位.....	1
1.2 电磁干扰的危害.....	6
1.3 电磁兼容研究内容.....	9
1.4 电磁兼容性设计.....	16
*1.5 电磁兼容的历史及发展.....	19
第 2 章 电磁骚扰源及特性	20
2.1 电磁骚扰源.....	20
2.2 雷电及其二次效应.....	24
2.3 电力系统产生的电磁骚扰.....	27
2.4 电气设备产生的电磁骚扰.....	30
2.5 公共场所的电磁骚扰源.....	36
*2.6 高能电磁骚扰.....	38
2.7 静电放电(ESD).....	40
2.8 骚扰源的特性分析.....	42
2.9 骚扰源的模型.....	44
第 3 章 电磁骚扰传播机理	51
3.1 电磁骚扰耦合途径.....	51
3.2 骚扰源对敏感设备的干扰模式.....	54
3.3 传导耦合.....	56
3.4 电磁辐射耦合.....	68
3.5 设备的电磁骚扰耦合途径分析.....	76
第 4 章 电磁屏蔽	81
4.1 电磁屏蔽的基本概念.....	81
4.2 屏蔽的基本原理.....	84
4.3 完整屏蔽体屏蔽效能的计算.....	87
4.4 不完整及非实壁屏蔽的屏蔽效能.....	94
4.5 屏蔽体设计.....	100
4.6 缝隙的电磁密封方法.....	104
4.7 屏蔽上孔洞的处理.....	109
第 5 章 接地与搭接	112
5.1 接地及其功能.....	112
5.2 设备的安全接地.....	113
5.3 信号地.....	116
5.4 地线中的干扰及消除.....	125

5.5	屏蔽接地	128
5.6	电子系统的接地方法	130
5.7	大型系统的接地举例	133
5.8	搭接	135
5.9	搭接网络	140
第 6 章	电磁干扰滤波技术	143
6.1	滤波器概念及分类	143
6.2	滤波器的主要特性	146
6.3	反射滤波器的原理及设计	147
6.4	损耗滤波器	154
6.5	电源 EMI 滤波器及设计	158
6.6	数字信号线 EMI 滤波器及设计	168
6.7	印制电路板 EMI 滤波器	171
第 7 章	电磁干扰的隔离与抑制技术	173
7.1	平衡电路	173
7.2	电磁干扰隔离装置	177
7.3	光电耦合隔离地环路	181
7.4	瞬时干扰的时间回避防护方法	182
7.5	防护元件	183
7.6	防护电路	191
7.7	触点开关噪声及其抑制	197
第 8 章	信号传输回路的干扰控制	201
8.1	屏蔽电缆的电磁耦合分析	201
8.2	辐射共模耦合	206
8.3	辐射差模耦合	213
8.4	信号传输电缆的空间电磁场防护	215
8.5	非平衡线路电缆屏蔽层外表面感生电流及控制	217
8.6	电缆间的串扰控制	220
8.7	电缆屏蔽层的接地	222
8.8	电缆引入屏蔽盒的接地方法	226
* 8.9	电缆连接器	228
第 9 章	印制电路板的电磁兼容设计	231
9.1	印制电路板电磁兼容基础	231
9.2	多层印制电路板设计	239
9.3	数字电路的电容设计	246
9.4	时钟电路的电磁兼容设计	248
9.5	地线和电源线的干扰及抑制	252
9.6	线路板的电磁辐射及抑制	255
9.7	I/O 接口及连接器设计	264
9.8	集成电路的 EMC 抑制	269
9.9	模拟电路的瞬态干扰抑制	274
* 9.10	防护电磁干扰的软件方法	277

第 10 章	电磁兼容性预测的原理	280
10.1	电磁兼容性预测	280
10.2	电磁兼容性预测的基本知识	284
10.3	电磁兼容性预测数学方法概述	289
10.4	电磁场的数值分析方法	292
10.5	EMC/EMI 数值模型的建立	298
10.6	电磁兼容性预测的分析步骤	304
第 11 章	电磁兼容测试设备及场地	306
11.1	概述	306
11.2	电磁骚扰测量设备	307
11.3	辅助测量设备	311
11.4	电磁抗扰度测试设备	320
* 11.5	电磁环境监测仪器	324
11.6	电磁兼容试验场地	328
第 12 章	电磁兼容测试方法	343
12.1	电磁兼容测试分类及测试标准	343
12.2	传导电磁发射测试	345
12.3	辐射电磁发射测试	350
12.4	传导抗扰度测试	353
12.5	辐射抗扰度测试	366
* 12.6	混响室测试	368
参考文献		373
中英文索引		379

第 1 章 电磁兼容导论

随着用电设备的增加,空间电磁能量逐年增加,人类生存环境具有浓厚的电磁环境内涵。在这种复杂的电磁环境中,如何减少相互间的电磁干扰,使各种设备正常运转,是一个亟待解决的问题;另外,恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良影响。电磁兼容正是为解决这类问题而迅速发展起来的学科。可以说电磁兼容是人类社会文明发展伴随产生的无法避免的“副产品”。

1.1 电磁兼容名词术语及单位

在系统介绍电磁兼容技术之前,先介绍电磁兼容及相关名词术语的定义,建立电磁兼容的正确概念,防止各种名词术语内涵的混淆和误解。本节名词术语的定义主要引自等同采用 IEC60050 的国家标准 GB/T 4365—1995《电磁兼容术语》,也参考《电磁兼容标准实施指南》(1999)给出了必要的补充解释。

1.1.1 电磁兼容的定义

Electromagnetic Compatibility(缩写 EMC)一词,对一门学科、一个领域、一个工业或技术范围来讲,应译为“电磁兼容”,以反映一个领域,而不仅仅是单项技术指标。而对于设备、分系统、系统的性能参数来说,则应译为“电磁兼容性”。对于电磁兼容的定义,常见的有以下几种:

(1)设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

(2)研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下,各种用电设备(分系统、系统,广义的还包括生物体)可以共存并不致引起降级的一门科学。

(3)设备(分系统、系统)在共同的电磁环境中能一起执行各自的功能的共存状态。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(系统、分系统)因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。

上述的电磁兼容定义都反映了电磁兼容所要求的两个基本方面,即在共同的电磁环境中,任何设备、分系统、系统都应该不受干扰并且不干扰其他设备。

电磁兼容由空间、时间、频谱三个基本要素组成。目前 EMC 学科领域范围日益扩大,电磁兼容涉及的频率范围宽达 0~400GHz。而我们经常遇到的“无线电”,现在由国际电联 (ITU)已经规划的可以利用的无线电频谱为 10kHz~400GHz,频率再低则进入声频,而再高则进入光波。

EMC 的研究对象除传统设施外,涉及芯片级,直到各型舰船、航天飞机、洲际导弹,甚至整个地球的电磁环境,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。正是由于本学科涉及的范围很宽,且其理论体系也有一定的特殊性,故本学科有时也取名为环境电磁学。而目前则更多地称为电磁环境学。

1.1.2 基本名词术语

(1)电磁发射:从源向外发出电磁能的现象。

此处“发射”与通信中常用的“发射”含义并不完全相同。电磁兼容中的发射既包含传导发射,也包括辐射发射,而通信中的发射主要指辐射发射。电磁兼容中的发射常常是无意的,因而常常并不存在有意的发射部分,一些本来用做其他用途的部件(如电线、电缆等)充当了发射的角色,而通信中的发射则是由无线发射台并通过精心设计与制作发射部件(如天线、探头等)来产生。通信中的发射也使用 emission,但更多的是使用 transmission。

(2)噪声(noise):电路中除希望信号以外的影响信号并可能使信号携带信息产生畸变的任何电信号。由电路非线性导致的失真电信号,虽然也不是人们希望的信号,但不能称其为噪声,因为它不是真正的噪声问题,而是属于电路设计问题,可以通过合理的电路设计来消除。

(3)干扰(interference):由于一种或多种发射、辐射、感应或其组合所产生的无用能量对电子设备的接收产生的影响,其表现为性能下降,误动或信息丢失,严重时出现设备损坏,如不存在这种无用能量则此后果可以避免。

干扰是由噪声导致的不希望的结果。人们常常把噪声和干扰混淆,其实二者的区别十分明显:噪声是原因,干扰是后果;噪声是无法消除的,它只能被削弱到一定程度,直到它不产生干扰。

(4)无用信号:可能损害有用信号接收的信号。

(5)干扰信号:损害有用信号接收的信号。

“无用信号”与“干扰信号”的差别仅在于无用信号可能产生损害,而干扰信号是会产生损害。这表明无用信号在某些条件下还是有用的、无害的;而干扰信号任何情况下都是有害的。此外,过去认为“干扰”与“信号”是一个对立面,信号是有用的,干扰是有害的。但根据新的国家标准,信号可以是有用的,也可以是无用的;可以是无害的,也可能是有害的。

(6)电磁骚扰(electromagnetic disturbance):任何可能引起装置、设备或系统性能降低,或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化而引起的。

(7)电磁干扰(electromagnetic interference):电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。

电磁骚扰仅仅是电磁现象,即指客观存在的一种物理现象,它可能引起降级或损害,但不一定已经形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。过去在术语上并未将物理现象与其造成的后果明确划分,统称为干扰(interference)。进入20世纪90年代,IEC 60050(161)于1990年发布后,才明确引入了称为“骚扰”的“disturbance”这一术语,与过去惯用的干扰一词明确分开。另外,电磁骚扰的范畴也扩大了,过去称之为电磁干扰的常仅指电磁噪声。现在电磁骚扰还包括了无用信号,此外还包括了传播媒介自身的变化。如短波通信电离层的变化,空气中雨、雾对微波通信的影响等。

严格地说,只要把两个以上的元件放置在同一环境中,工作时就可能产生电磁干扰。电气及电子设备工作时不可避免地产生一些有用或无用的电磁能量,这些能量会影响其他设备或系统的工作,这就是电磁骚扰。在两个系统之间的骚扰,称为系统间骚扰;在系统内部各设备

之间的骚扰称为系统内骚扰。电磁骚扰的危害程度可分为灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的和使人烦恼五个等级。

(8)电磁噪声(electromagnetic noise):一种明显不传送信息的时变电磁现象,它可能与有用信号叠加或组合。“电磁”现象包括所有的频率,除包括无线电频率(10kHz以上)之外,还包括直流在内的所有的低频电磁现象。

(9)电磁环境(electromagnetic environment):存在于给定场所的所有电磁现象的总和。“给定场所”即“空间”,“所有电磁现象”包括了全部“时间”与全部“频谱”。

ANSI对电磁环境的定义为:一个设备、分系统或系统在完成其规定任务时可能遇到的辐射,或传导电磁发射电平在各个不同频段内的功率分布及其随时间分布,即存在于一个给定位置的电磁现象的总和。而电磁环境效应[electromagnetic environment effects (E3)]的定义为“电磁环境对电子或电气系统、设备或装置的工作性能的影响”

(10)性能降低:装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离。

这种非期望偏离(指向坏的方向偏离)并不意味着一定会被使用者觉察,但也应视为性能降低。例如,一个接收灵敏度指标为 $1\mu\text{V}$ 的手机,在可以使天线终端(即接收机输入端)获得 $10\mu\text{V}$ 的有用信号场中工作,显然,此时手机工作正常。若由于某种电磁干扰(如大干扰信号阻塞)使该手机的灵敏度降低至 $5\mu\text{V}$,此时应视为该机工作性能已降低,但使用者并不会觉察到通信质量下降。

(11)(对骚扰的)抗扰度:装置、设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。

(12)(电磁)敏感性:在存在电磁骚扰的情况下,装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。敏感性高,则抗扰度就低。

实际上,抗扰度与敏感性是从不同的角度反映装置、设备或系统的抗干扰能力。军用标准体系常用敏感性这一术语,而民用标准体系惯用抗扰度一词。

(13)(时变量的)电平:用规定方式在规定时间间隔内求得的诸如功率或场参数等时变量的平均值或加权值。电平可用对数来表示,如相对某一参考值的分贝数。level一词,在强电领域习惯译为“水平”,如“lightning withstand level”译为“耐雷水平”。

(14)骚扰限值允许值:对应于规定测量方法的最大电磁骚扰允许电平。

(15)干扰限值允许值:电磁骚扰使装置、设备或系统的最大允许的性能降低。干扰限值是性能降低的指标,而不是电磁现象的指标。

(16)电磁兼容电平:预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上规定的最大电磁骚扰电平。实际上电磁兼容电平并非绝对最大值,而可能以小概率超出。

(17)发射电平:用规定的方法测得的由特定装置、设备或系统发射的某给定电磁骚扰电平。“某给定电磁骚扰”指的是某种电磁场的量,如功率、电压、场强等,也包括频率在内。

(18)发射限值:规定电磁骚扰源的最大发射电平。是人为规定的,而不是骚扰源本身的特性。

(19)发射裕度:装置、设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值。

(20)抗扰度电平:将某给定的电磁骚扰施加于某一装置、设备或系统而其仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大骚扰电平。超过此电平,该装置、设备或系统就会出现性能降低。而敏感性电平,是指刚刚开始出现性能降低的电平。所以,对某一装置、设备或系统而言,抗扰性电平与敏感性电平是同一个数值,但实际上,抗扰度电平是设备干扰耐受能力的最小值,而敏感性电平是设备对干扰敏感的最大值。

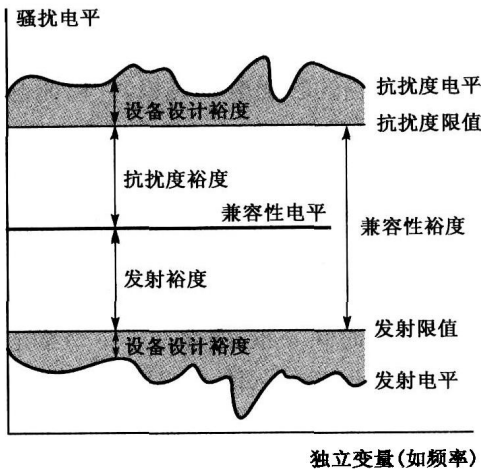


图 1.1.1 发射/抗扰度限值、兼容电平与独立变量之间的关系

(21) 抗扰度限值: 规定的最小抗扰度电平。

“限值”是人为规定的参数, 而“电平”是装置、设备或系统本身的特性。

(22) 抗扰度裕度: 装置、设备或系统的抗扰度限值与电磁兼容电平之间的差值。

(23) (电磁) 兼容裕度: 装置、设备或系统的抗扰度电平与骚扰源的发射限值之间的差值。

如图 1.1.1 所示为与敏感设备相关的电平与独立变量(如频率)之间的关系。

1.1.3 分贝的概念

分贝是两个功率之比值的对数, 英文缩写为 dB。

$$\text{分贝数} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} \quad (1.1.1)$$

分贝可以用来表示功率增益($P_2 > P_1$)或功率损耗($P_2 < P_1$)。

电压和电流的平方对应功率, 因此, 对电压和电流使用分贝时, 定义如下:

$$\text{电压增益分贝数} = 20 \lg \frac{V_2}{V_1} \text{ dB} \quad (1.1.2)$$

$$\text{电流增益分贝数} = 20 \lg \frac{I_2}{I_1} \text{ dB} \quad (1.1.3)$$

这些定义的基础是必须在相同阻抗上测量。在 EMC 中, 干扰的幅度范围和频率范围都很宽, 电磁兼容中使用分贝数的好处是, 可以用较小的坐标来描述很宽的范围。

另外, 也可以用分贝来表示功率 P 、电压 V 和电流 I 等物理量的绝对数值, 表示这个物理量相对于某一个参考数值的分贝数。一般功率以 $1\mu\text{W}$ 、 1mW 或 1W 作为参考, 则其单位为 $\text{dB}\mu\text{W}$ 、 dBmW 和 dBW :

$$\text{dB}\mu\text{W} = 10 \lg \frac{P}{1\mu\text{W}}, \quad \text{dBmW} = 10 \lg \frac{P}{1\text{mW}}, \quad \text{dBW} = 10 \lg \frac{P}{1\text{W}}$$

一般电压以 $1\mu\text{V}$ 、 1mV 或 1V 作为参考, 则其单位为 $\text{dB}\mu\text{V}$ 、 dBmV 和 dBV :

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20 \lg \frac{V}{1\mu\text{V}}, \quad \text{dBmV} = 20 \lg \frac{V}{1\text{mV}}, \quad \text{dBV} = 20 \lg \frac{V}{1\text{V}}$$

同样, 一般电流以 $1\mu\text{A}$ 、 1mA 或 1A 作为参考, 则其单位为 $\text{dB}\mu\text{A}$ 、 dBmA 和 dBA 。根据分贝的定义, 则 $1\mu\text{A}$ 的电流为 $0\text{dB}\mu\text{A}$, $10\mu\text{V}$ 的电压为 $20\text{dB}\mu\text{V}$, 1kW 的功率为 30dBW 。

例 1.1 一个设备在进行辐射发射试验时发现在某个频率上有超标发射。经过分析, 认为有 4 个地方可能是泄漏源, 如图 1.1.2 所示。于是设计人员开始判断问题所在, 并试图解决。首先对其中一个可能的泄漏源进行技术处理, 消除泄漏。结果他发现超标辐射并没有明显改善。因此他认为这个地方不是重要的电磁泄漏点, 于是他将所采取的技术措施去掉, 然后对另一个可能的问题点采取措施, 结果仍然不是主要泄漏点, 于是去掉所采取的措施。如此反复, 检查了 4 个可能的泄漏源也没有发现问题所在。造成该问题的原因是由于对分贝的概念没有理解。假设 4 个可能的泄漏源的泄漏强度 P 是相同的。则将 1~4 个泄漏源去掉后, 辐射改善为

去掉一个泄漏源: 辐射改善 $20\lg[1/(3/4)]=2.5\text{dB}$
 去掉两个泄漏源: 辐射改善 $20\lg[1/(2/4)]=6.0\text{dB}$
 去掉三个泄漏源: 辐射改善 $20\lg[1/(1/4)]=12.0\text{dB}$
 去掉四个泄漏源: 辐射改善 $20\lg[1/(0/4)]=\infty\text{dB}$

当然, 去掉 4 个骚扰源时, 辐射改善不可能是无限大, 因为任何技术措施不可能将泄漏完全消除, 但改善往往是相当大的。这并不说明第 4 个泄漏源是主要的泄漏源, 只是说明是最后一个泄漏源。正确的诊断方法是, 处理完的泄漏源, 即使改善不明显, 也不能拆除, 保留着, 继续对其他可疑点进行处理。

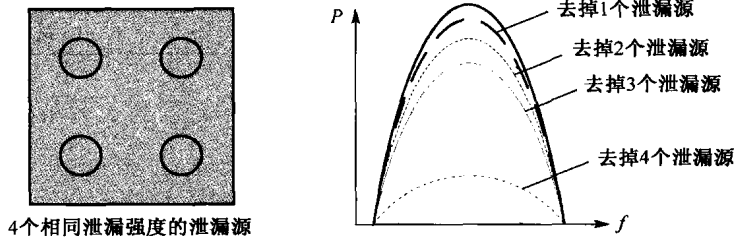


图 1.1.2 4 个具有相同泄漏强度的泄漏源

1.1.4 电尺寸

电磁兼容问题涵盖很宽的频率范围。离开骚扰源的频率来说电子电路或辐射体的物理尺寸是没有意义的。一个固定的物体尺寸相对于不同频率的骚扰源, 该物体可以看成是小尺寸或大尺寸, 在确定骚扰源对敏感设备的耦合能力时, 物体本身的物理尺寸是不太重要的, 而电尺寸显得更为重要。

电尺寸是物理尺寸与骚扰源波长的相对值:

$$k = \frac{l}{\lambda} = \frac{lf}{v} \quad (1.1.4)$$

式中, k 为物体的电尺寸; l 为物体的物理尺寸; λ 是骚扰源的波长; f 是骚扰源的频率; v 是电磁波在物体所在媒质中的波速度。

如果一个电子电路或辐射体的 $k \ll 1$, 或物体的物理尺寸远远小于骚扰源的波长, 则该电子电路或辐射体就被称为电小尺寸。一般当物体的物理尺寸小于波长的十分之一时, 就认为该物体是电小尺寸。

1.1.5 窄带和宽带

当超宽带(UWB)技术在 20 世纪 80 年代刚刚出现时, 普遍采用的百分比带宽 B_{wp} 定义为带宽(信号中的高频与低频之差, 传统上的 -3dB 点)与中心频率 f_c 之比(f_c 是指高频 f_h 与低频 f_l 的平均值):

$$B_{wp} = 200 \times \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} (\%) \quad (1.1.5)$$

窄带百分比带宽小于 1%, 中频带的百分比带宽为 1%~25%, 而超宽带的百分比带宽大于 25%。

然而, 上述定义源于通信的观点, 并不完全适合宽带信号, 如实际的 UWB 波形可以达到的百分比带宽大于 190%, 比可能的最大值大 200%。目前比较认可的带宽比的定义由 Giri 提出:

$$B_{wp} = 200 \times \frac{B_r - 1}{B_r + 1} (\%) \quad (1.1.6)$$

$$B_r = \frac{f_h}{f_l} \quad (1.1.7)$$

另外,波段比值 B_r 也可以用 B_{wp} 来表示:

$$B_r = \frac{200 + B_{wp}}{200 - B_{wp}} \quad (1.1.8)$$

根据此定义,Giri 提出了如表 1.1.1 所示的分类方法。

表 1.1.1 带宽分类

带宽范围	百分比带宽 B_{wp}	波段比值 B_r
窄带	$B_{wp} \leq 1\%$	$B_r \leq 1.01$
中频带	$1\% < B_{wp} \leq 100\%$	$1.01 < B_r \leq 3$
宽带	$100\% < B_{wp} \leq 163.4\%$	$3 < B_r \leq 10$
超宽带	$163.4\% < B_{wp} \leq 200\%$	$10 < B_r$

1.2 电磁干扰的危害

对电子设备承受电磁骚扰影响的分析、评估和提高其抗干扰能力是电磁兼容设计的目的。通常用电磁敏感度(EMS)来表示电子设备受电磁干扰作用引起不希望响应或性能降低的量度,反映了设备耐受电磁干扰能力的特性。设备对干扰的敏感电压阈值越低,设备对电磁干扰就越敏感,设备的电磁敏感度就越高。采用不同电路原理、不同的元器件及结构的电子设备受电磁干扰影响的程度和抗干扰的能力有很大的差别。敏感度就是对设备因接收骚扰引起不希望响应的干扰量度。

1.2.1 电子设备对 EMC 的耐受能力

一般来说,电子设备或系统在设计的耐受能力下,具有一定的工作在预定的电磁环境中的能力,即具有电磁兼容能力。一般电子设备对电磁干扰的灵敏性包括如下几个方面:

(1)按照电压、电流和频率,根据信号水平确定的干扰耐受能力;

(2)设备承受信号频率范围以外的干扰频率的耐受能力;

(3)设备承受不同频率的电磁场的耐受能力;

(4)与暂态电压有关的绝缘耐受能力。一般的机电设备、甚至电子设备声称的绝缘耐受能力为 2kV。

在《水电厂计算机监控系统基本技术条件》中规定了各种监控系统应具有一定的绝缘强度:500V 以下,60V 以上系统的端子与外壳间应能耐受交流 2kV 电压 1min,60V 以下端子与外壳间应能耐受交流 500V 电压 1min。同时应具有一定的传导干扰抑制能力,满足下面规定的 2 级或 3 级要求:

对于 1~1.5MHz 衰减振荡:1 级为 0.5kV,2 级为 1kV,3 级为 2.5kV;

对于 1.2/50 μ s 冲击波:1 级为 1kV,2 级为 3kV,3 级为 5kV。

当电磁骚扰达到一定值时,电子设备将会出现暂时性的误动作或功能失调,降低电子设备的性能,严重时将发生永久性的损坏。电子设备对电磁干扰存在一定的电压损坏阈值、电流损

坏阈值、电场损坏阈值、磁场损坏阈值及能量损坏阈值。当干扰电压超过电压阈值时将引起电子设备的绝缘破坏。当一次干扰的能量超过能量损坏阈值时,电子设备将由于发热而烧坏。由于 20 世纪 80 年代电子设备发生了根本的变化,集成电路取代了晶体管,这就使抗毁(高压大电流击穿烧坏)能力大大下降,集成电路为晶体管的千分之一,为电子管的百万分之一乃至千万分之一。微电子技术水平越高,电子设备的抗毁能力就越差。表 1.2.1 为一些电子器件及设备的能量损坏阈值。

表 1.2.1 引起电子设备破坏或失常的最小能量

名 称	最小能量/J	故障形式
数据输入门集成电路 MC715	8×10^{-5}	烧毁
隧道二极管 1N3720	5×10^{-4}	烧毁
超高频振荡器电子管 6AF4	1	烧毁
低电流继电器	2×10^{-3}	触点熔接
微安表	3×10^{-3}	表头受撞击
逻辑晶体管门电路	3×10^{-9}	电路失常
J-K 双稳态单片集成电路	4×10^{-10}	电路失常
快速计算机磁芯存储器 FC2001	2×10^{-9}	记忆消除
放大器	4×10^{-21}	干扰

计算机对雷电极敏感,即使几公里以外的高空雷闪或雷对地闪络,都有可能导致计算机控制的设备误动作或损坏, $0.03Gs$ ($1Gs = 10^{-4}T$)的磁感应强度可造成计算机误动作, $2.4Gs$ 即可使元件击穿。计算机一般在 $1V/m$ 的外界电场的作用下工作,外界电场超过 $5V/m$ 就不安全了,存储器在 $15V/m$ 下无法工作,机房应着重保证对 $0.15 \sim 500MHz$ 范围内的电磁防护。国标 GB2887—82 规定计算机设备应远离 $110kV$ 高压线 $100m$ 以上,机房附近的磁场强度小于 $10Oe$ (奥斯特, $1Oe = 79.6A/m$),背景电磁噪声小于 $120dB$,否则就应采取措施,加以屏蔽和防护,甚至用金属六面体将机房封闭起来。对磁场极敏感的设备,应储存在限制了磁通密度的环境中,磁带和磁盘装置的典型储存极限在 $(50 \sim 70) \times 10^{-4}T$ 范围内,显示器放置处磁通密度应在 $1 \times 10^{-4}T$ 的范围内。

1.2.2 电磁干扰的危害

电磁干扰有可能使设备或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”,甚至还可能使设备或系统失灵,或导致寿命缩短,或使系统效能发生不允许的永久性下降,严重时,还能摧毁设备或系统。

1. 电子系统

电子计算机、微处理器及其他由大型 CMOS 集成电路等元件组成的电子仪器设备普遍存在着对电网电压质量要求较高,浪涌电压承受能力较弱等缺点。电磁环境不仅能造成用电设备产生误操作,严重的甚至还造成用电设备的永久性损坏。据国外对电子设备和系统损坏事件的统计表明,约 25% 的电子设备和系统的损坏事故是由雷电等电磁干扰所造成,电磁干扰成为该类设备损坏的主要原因之一。据统计,美国每年因雷害等电磁干扰而导致设备损坏的损失就达 260 亿美元。如图 1.2.1 所示为芯片及印制线被电磁干扰破坏的电路板。

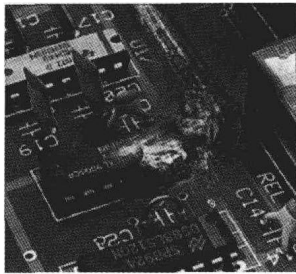


图 1.2.1 被电磁干扰破坏的电路板

一个典型的电磁干扰现象是电视机屏幕上的干扰条纹。这些条纹来自附近的数字设备,如个人计算机、VCD、DVD 或其他数字视频设备。因为电视机是灵敏度很高的电场波接收设备,而数字脉冲信号中含有丰富的高次谐波。

在我国由于雷击而引起的电子系统损坏的事故时有发生。例如,1992年6月22日傍晚,国家气象中心大楼遭雷击,楼内的大型计算机和小型计算机网络中断,整个计算机系统停止工作46小时,气象业务受到严重影响;1994年夏,湖南省人民银行的计算机毁于雷电事故而造成停业,由此产生的间接经济损失惊人;1994年,一场普通雷雨,北京天安门地区竟有4个重要部门的高科技设备同时损坏,其影响的严重性不难估计;1992年9月16日深圳国际机场因感应雷电过电压导致25套通信、雷达、导航设备中有5套损坏,几乎使机场停业。另外,美国联邦航空局的调查结果表明,这样的事故时有发生,每次事故都造成几十万到上百上千万元的经济损失。

2. 电力系统

电力系统的高电压强电系统与控制保护等弱电系统之间存在很严重的电磁兼容问题,其特点是电磁环境恶劣,电力系统操作以及雷电等通过各种途径在发变电站产生的暂态干扰会通过各种耦合方式在弱电系统内产生相应的干扰电压。而控制保护等设备性能先进,但抗干扰能力很弱。特别是电子和微电子装置,其耐压水平和抗干扰能力都比较弱,如不采取措施,可能会影响电力系统的安全可靠运行。

由强电系统的开关操作在弱电系统中产生的暂态干扰引起的变电所事故在国内外都发生过。1988年我国某500kV变电所在操作220kV隔离开关时产生的暂态过电压耦合到弱电系统中,冲击损坏了几十只晶体管且使开关误动作就是一例。葛洲坝500kV变电站调试过程中,隔离刀闸切合空母线时产生的干扰将差动保护的7片集成电路元件损坏。前苏联的某一500kV变电站曾因单相接地故障将直埋地下与外界联系的通信电缆损坏2.0km。测量表明,系统短路引起地电位升高时,电缆的芯-屏蔽层之间的电压可达系统电压的20%~50%。美国在500kV变电站测得暂态干扰的频率为200Hz到数兆赫兹,幅值从数伏到20kV。德国对26个110~380kV变电站的弱电系统中的干扰进行了测量,从1648个试验数据中分析表明,在采取了暂态电压抑制措施的变电站中,被测幅值的75%控制在4kV的范围内;在无抑制措施的变电站中,则75%的幅值在100kV以下。国内外研究者力求从变电站的布置、接地网的结构、弱电系统电缆的屏蔽、接地和走向等方面,将弱电系统的干扰电压限制到控制和保护器件可以承受的水平,从而进一步提高变电站运行的安全和可靠性。

3. 航天航空系统

1969年11月美国土星“V-阿波罗12”载人飞船在起飞后出现雷击事故,阿波罗系列登月火箭前后共发生7次雷击事故。1987年3月26日美国国家航天局的大力神/半人马座火箭升空不久遭到雷击,火箭及携带的卫星均被炸毁,损失极大。除了雷击外,其他电磁干扰事故也是造成故障的原因,如导兵I导弹飞行故障和欧罗巴II火箭故障。

欧罗巴II火箭的第一发(代号F-11)于1971年11月5日发射。火箭起飞后105s,高度约27km,制导计算机发生故障,姿态失控。约1min后,火箭炸毁。故障分析与模拟试验的结果表明,火箭在主动段飞行中产生了静电荷。这些电荷逐渐积累并储存于介质材料的表面。由

于气动加热,介质材料温度升高,其电阻值相应减小。对于静电而言,介质材料便从绝缘体变为导体。这样,部分电荷便转移到相邻的未接地的金属体上。当飞行高度增加,气压下降到一定值时,即发生静电放电而引起计算机故障,从而导致飞行失败。

1.3 电磁兼容研究内容

EMC 设计已发展成为一门涉及多学科的、综合性的学科分支。人们只有从基本理论的高度来认识它,全面掌握它的科学原理和规律,才能真正做好 EMC 设计。解决 EMC 问题涉及许多知识领域和技能,EMC 设计工程师必须根据设计要求,将这些知识加以融合,以合理的成本提出经济、有效的 EMC 解决方案。

电磁兼容具有以下三方面的含义:

- (1)电磁环境应是给定的或可预期的;
- (2)设备、分系统或系统不应产生超过标准所规定的电磁骚扰发射(EMI)限值的要求;
- (3)设备、分系统或系统应满足标准所规定的电磁敏感性(EMS)限值或抗扰度(immunity)限值的要求。

在本节,我们首先对电磁兼容研究的内容作全面扼要的介绍,以便让读者对电磁兼容问题先建立一个系统的概念,然后在后面章节中分别加以详细介绍。图 1.3.1 所示为本书的内容体系。

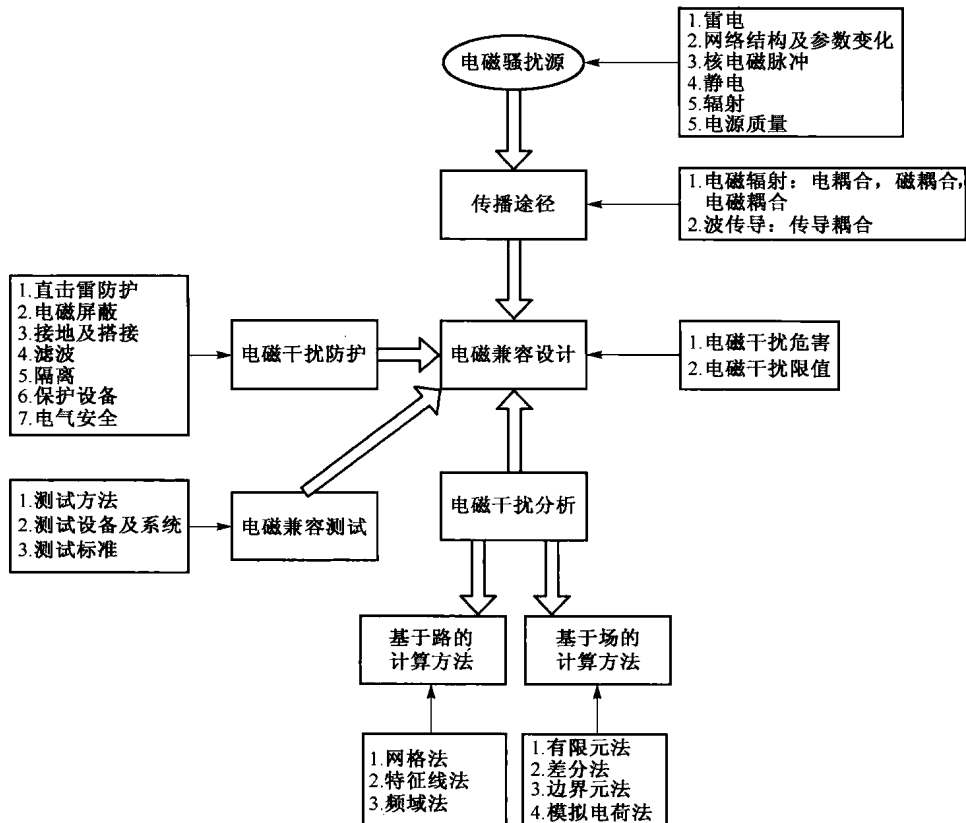


图 1.3.1 电磁兼容体系