



孙可平 主编

电磁兼容性与抗干扰技术

DIANCI JIANRONGXING YU KANGGANRAO JISHU



大连海事大学出版社

© 孙可平 2006

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容性与抗干扰技术 / 孙可平主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2005.12

ISBN 7-5632-1901-3

I. 电… II. 孙… III. ①电磁兼容性②抗干扰—技术
IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 123998 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连印刷三厂印装 大连海事大学出版社发行

2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

幅面尺寸:140 mm×203 mm 印张:10.125

字数:253千字 印数:1~1500册

责任编辑:史洪源 阴洁 版式设计:海韵

封面设计:王艳 责任校对:一凡

定价:15.00元

内容简介

《电磁兼容性与抗干扰技术》系统地阐述了电磁干扰及其危害、电磁干扰的传播与耦合理论,讨论了电磁干扰控制技术;计算机及信息技术设备的电磁兼容性;静电放电抗扰度试验;车、船等运载工具的电磁兼容性。

书中反映了编者从事电磁兼容教学与研究的心得、体会与见解,并尽可能地介绍了国内外的最新研究成果。

本书适合电气工程、电子工程、计算机与信息工程、通信工程、机电一体化、物流技术与工程、交通运输与管理等相关专业的硕士研究生、高年级本科生教学使用,也可供相关专业工程技术人员参考。

前 言

随着电子、信息技术的应用在各个领域的扩展与渗透,人类所处的电磁环境越来越严峻。有专家估计,空间人为电磁能量每年增长 7%~14%,即 25 年后环境电磁能量密度最高可增加 26 倍,50 年可增加 700 倍。正因为如此,越来越多的人关注、重视环境电磁学及电磁兼容技术这一新兴边缘学科。

本书编者在为上海海事大学相关专业研究生、本科生讲授“电磁兼容性与抗干扰技术”课程的基础上,编写完成了该书。书中反映了编者从事电磁兼容教学与研究的心得、体会与见解,并尽可能地介绍了国内外的最新研究成果。

全书共分七章。第一章概述了电磁兼容定义、电磁兼容国际组织、电磁兼容国际标准、电磁兼容学科的主要特点。第二章论述了电磁干扰三要素、电磁干扰频谱、电磁干扰的危害,介绍了各种人为和自然电磁干扰源。第三章阐述了电磁干扰的传播与耦合理论。第四章从几个方面介绍了电磁干扰控制技术,既有综合论述,又有应用实例。第五章介绍了计算机及信息技术设备的电磁兼容问题。第六章介绍了静电放电的特点与类型、常见静电放电模型、静电放电的危害,介绍了静电放电抗扰度试验的等级、试验方法、运行条件及性能判据。第七章介绍了交通运输行业涉及到的车、船等运载工具的电磁兼容问题。

本书既可作为电气工程、电子工程、计算机与信息工程、通信工程、机电一体化、物流技术与工程、交通运输与管理等相关专业的硕士研究生、高年级本科生的教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

在本书编写与出版过程中,得到了“上海市重点学科建设项目”(项目编号:T0602)的资助。在此谨致谢意。

由于编者水平有限和时间仓促,书中难免有错漏之处,敬请读者不吝赐教。

编 者

2005 年 10 月

目 录

第一章 电磁兼容概述.....	(1)
第一节 定义.....	(1)
第二节 电磁兼容的主要研究领域 ——认识 EMD, 研究 EMD, 控制 EMD	(2)
第三节 电磁兼容技术的发展.....	(4)
第四节 电磁兼容标准化组织简介.....	(5)
第五节 电磁兼容国际标准.....	(8)
第六节 电磁兼容学科的主要特点	(15)
第二章 电磁干扰及其危害	(19)
第一节 电磁干扰三要素	(19)
第二节 电磁干扰的频谱	(21)
第三节 电磁干扰的危害	(24)
第四节 电磁干扰源	(51)
第五节 电源或电源线干扰	(68)
第三章 电磁干扰的传播与耦合	(71)
第一节 电磁干扰的基本传播途径与耦合	(71)
第二节 传导耦合的基本原理	(73)
第三节 辐射耦合的基本原理	(83)
第四节 电磁耦合的过程分析方法与实例	(95)
第四章 电磁干扰控制技术.....	(153)
第一节 电磁干扰控制策略.....	(153)
第二节 空间分离.....	(153)
第三节 时间分隔与时间回避.....	(154)
第四节 频率划分与管制.....	(155)
第五节 电气隔离.....	(157)
第六节 接地技术及其应用.....	(159)
第七节 屏蔽原理及屏蔽技术的应用.....	(165)

第八节	电源干扰抑制技术·····	(187)
第九节	搭接及搭接技术·····	(193)
第五章	计算机及信息技术设备的电磁兼容性·····	(207)
第一节	计算机及信息技术设备的电磁兼容性 综述·····	(207)
第二节	计算机及信息设备电磁兼容问题的 新动向·····	(210)
第三节	计算机元、部件抗干扰措施·····	(212)
第四节	计算机传输通道的电磁兼容问题·····	(218)
第五节	计算机及信息设备印刷电路板抗干扰 措施·····	(221)
第六节	计算机电源系统的电磁兼容问题·····	(226)
第七节	计算机空间电磁干扰的抑制技术·····	(229)
第八节	计算机软件抗干扰技术简介·····	(233)
第六章	静电放电抗扰度试验·····	(241)
第一节	概述·····	(241)
第二节	静电放电的特点及类型·····	(242)
第三节	静电放电模型·····	(249)
第四节	静电放电的危害·····	(255)
第五节	静电放电模拟器·····	(260)
第六节	静电放电抗扰度试验·····	(268)
第七章	车、船等运载工具面临的新问题	
	——车、船电磁兼容性·····	(281)
第一节	概述·····	(281)
第二节	车、船等运载工具产生的电磁干扰限值及 测试方法·····	(283)
第三节	车、船等运载工具中电子电器组件受外界 电磁辐射抗扰度测试方法·····	(300)
第四节	船舶电磁兼容性仿真实验简介·····	(310)

第一章 电磁兼容概述

第一节 定 义

电磁兼容一词,源于英语 electromagnetic compatibility (EMC),按直译应为电磁兼容性。国家标准 GB/T4365—1995 制定工作组经过认真讨论达成如下共识:electromagnetic compatibility 一词,对一门学科、一个领域、一个技术范围来讲,应译为“电磁兼容”,以便反映整个一个领域,而不仅仅是一项技术指标;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”。根据这一共识,GB/T4365—1995 的标准名称用“电磁兼容术语”;而标准内的词条则用“电磁兼容性”。

一个系统的电磁兼容性,实际上体现在两个方面:一方面,一个系统必须以整体电磁环境为依据,要求每个用电设备不产生超过一定限度的电磁发射;另一方面,又要求它具有一定的抗干扰能力。只有对每一设备作这两方面的约束,才能保证系统达到完全电磁兼容。

国际上对电磁兼容虽有各种定义,但都体现了这两方面的要求。

国际电工技术委员会(IEC)的定义:电磁兼容是设备的一种能力,是设备在其电磁环境中能完成它的功能,而不至于在其环境中产生不允许的干扰。

国际电气和电子工程师学会(IEEE)对 EMC 的定义:一个装置能在其所处的电磁环境中满意地工作,同时又不向该环境及同

一环境中的其他装置排放超过允许范围的电磁扰动。

国家标准 GB/T4365—1995“电磁兼容术语”的定义：“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”。它基本上等同于 IEC60050(161)中的定义。

我国军标 GJB71—85《电磁干扰和电磁兼容名词术语》中的定义：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的其他设备的电磁发射导致或遭受不允许的降低，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低。

在以上的定义中，都涉及电磁环境这一概念。实际上，电磁环境是由空间、时间、频谱三个要素组成的。所有需要解决的电磁兼容问题都脱离不开这三个要素。

对于上述的几个定义，无论文字如何表达，都反映了这样一个基本事实：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。

本课程常涉及到的几个基本术语有：

电磁兼容性(Electromagnetic compatibility, 缩写 EMC)

电磁干扰(Electromagnetic interference, 缩写 EMI)

电磁辐射(EM radiation, 缩写 EMR)

电磁干扰(EM disturbance, 缩写 EMD)

抗扰性(immunity)或(to a disturbance)

第二节 电磁兼容的主要研究领域

——认识 EMD, 研究 EMD, 控制 EMD

如果用一句话来概括，EMC 的研究内容为认识 EMD(电磁干扰)，研究 EMD，控制 EMD。具体涉及以下几个领域。

(1) EMD 特性的研究

包括 EMD 产生的原因、机理、频域或时域的特性,表征其特性的主要参数等。

(2) EMD 传输、耦合机理与传播特性

与一般研究有用信号的天线与电波传播相比,EMC 领域的特点在于:源的非理想化(源的频域、时域特性的复杂性,源的几何参数的复杂性)以及宽的频率范围。例如,从 10 kHz 至 1 000 MHz,就包括了近 17 个倍频程,而有用信号从来不会涉及如此宽的频率范围。从波长看,10 kHz 的波长为 30 000 m,而 1 000 MHz 的波长仅 0.3 m。对于同一距离(10 m 或 100 m),对于 1 000 MHz 为远场区,而对于 10 kHz 则为近场区。这就使得 EMC 领域中传播特性的研究经常需要同时考虑近场与远场,而且传导与辐射并存,从而使问题更加复杂。

(3) 设备的抗干扰性能及抗干扰技术措施

研究、开发各种实用的抗干扰技术,不断提高设备的抗干扰性能,是电磁兼容的重要研究内容。

(4) 电磁兼容测量技术

电磁兼容测量技术包括测试理论、测量方法、测试设备、数据处理及测量结果评价。

由于电磁兼容的复杂性,理论的结果往往与实际相距较远。为了各个国家、各个实验室测量结果之间的可比性,必须详细规定测量仪器的各方面指标,并且各个国家的仪器指标应该严格的相同。美国肯塔基大学的 Dr. Paul 说过:“在判定最后结果方面,也许没有任何其他学科像电磁兼容那样更依赖于测量。”电磁兼容测量技术的重要性可见一斑。

(5) 电磁兼容预测与分析

电磁兼容预测与分析是采用计算机数字仿真技术,将各种电磁干扰特性、传输函数和敏感度特性全都用数学模型描述编制成

程序,然后根据预测对象的具体状态,运行预测程序来获得潜在的电磁干扰计算结果。该预测方法在发达国家已普遍采用。实践证明它是行之有效的方法。因此研究预测数学模型、建立输入参数数据库、提高预测准确度等已成为电磁兼容学科的重要内容之一。

(6)信息设备电磁泄漏及防护技术

保密机要电子设备(计算机、打字机、文电终端、打印机绘图仪等)工作时,机密信息可能通过设备泄漏的电磁波辐射出去,也可能通过电源线、地线和信号线以传导方式耦合出去。在一定距离内,往往不需要特殊仪器设备便可接收到这些机要信息的内容。为了机要信息设备的安全防护,防止电磁泄漏,20世纪70年代在西方出现了一项新技术,称为防电磁泄漏技术(Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard, TEMPEST)。其任务是检测、评价和控制来自机要信息设备的非功能传导发射和辐射,以防止窃听泄密的危险。当然,该技术还具有不同于一般电磁兼容技术的特殊研究内容。

(7)EMC系列标准和规范。

第三节 电磁兼容技术的发展

20世纪40年代初,随着无线电通信、广播的发展,干扰与反干扰提上了议事日程。人们开始提高设备可靠性的研究,提出了电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility, EMC)的概念。

1944年德国电气工程师协会制订了世界上第一个EMC规范VDE 0878。

1945年美国颁布了最早的军用规范JAN-I-225。

到了20世纪70年代,EMC已成为非常活跃的学科领域。EMC国际学术会议每年一次。国际电气和电子工程师学会(IEEE)的权威杂志,专门设立了EMC分册。美国B.E.凯瑟出版

了电磁兼容学科的经典论著《电磁兼容原理》。

20 世纪 80 年代,美国、德国、日本、前苏联、法国对 EMC 研究已达到很高水平。主要研究内容包括:EMC 标准与规范;EMC 分析设计和预测;研制出了高精度的 EMD 及 EM 敏感度自动测量系统,开发出了系统内外 EMC 计算分析软件;EMC 试验测量和开发屏蔽导电材料,成功开发了各种抑制 EMD 的新材料和新工艺;EMC 培训和管理等。

20 世纪 90 年代,EMC 已从事后检测处理发展到了预先分析评估、预先检验、预先设计。电磁兼容性已成为产品可靠性保证的重要组成部分。

20 世纪 90 年代后期,EMC 认证已从一个国家发展到一个地区或地区联盟。1996 年 1 月 1 日,欧共体 12 国和北欧 6 国共同宣布实行 EMC 许可证制度,使得 EMC 认证与电子电工产品安全性认证处于同等重要的地位。

我国对 EMC 的研究起步较晚。直到 20 世纪 80 年代才系统地研究并制定国家和行业 EMC 标准。1981 年航空部颁布了第一个 EMC 行业标准:HB5662-81,《飞机设备 EMC 要求和测量方法》。此后相关标准与规范的制定才有了较大发展。目前已有 30 多个国标及军标。1987 年举办了全国第一届 EMC 学术会议。1990 年在北京举办了第一届 EMC 国际会议,标志着全国电磁兼容学科的迅速发展并开始参与世界交流。

第四节 电磁兼容标准化组织简介

随着微电子技术在各行各业、各领域中的广泛应用,对电磁环境的要求越来越高,电磁兼容已成为国际上普遍关注的问题之一。很多国际机构和国际组织对电磁兼容问题开展了研究,如国际电工委员会(IEC)、国际大电网会议(CIGRE)、国际发供电联盟

(UNIPED)、国际电报电话咨询委员会(CCITT)、国际无线电咨询委员会(CCIR)、国际电信联盟(ITU)、国际电气和电子工程师学会(IEEE)等,其中影响最大的是 IEC 和 IEEE。

IEC 目前共有 88 个技术委员会(Technical Committee, TC), 106 个技术分委员会(Subcommittee, SC), 其中从事 EMC 的主要有:

国际无线电干扰特别委员会(CISPR)

第 77 技术委员会(Technical committee 77, TC77)

下面分别对 CISPR 和 TC77 作一简要介绍。

CISPR

CISPR 下设全体会议、指导委员会、分会(SC)、工作组(Working Group, WG)和特别工作组(Special Working Group, SWG)。全体会议由全体成员国的代表组成,是最高权力机构,每三年举行一次全体会议。指导委员会通常每年召开一次会议。其职责是协助 CISPR 主席处理日常事务,并提供咨询。

CISPR 的 8 个分会分别是:

- (1) CISPR/A 无线电干扰测量和统计方法
- (2) CISPR/B 工业、科学、医疗射频设备(ISM)的无线电干扰
- (3) CISPR/C 架空电力线、高压设备和电力牵引系统的无线电干扰
- (4) CISPR/D 机动车辆和内燃机的无线电干扰

第四分会下设两个工作组:一个是针对车、船等运载工具可能对其他接收设备的电磁干扰,即 WG1。重点是建筑物中使用的接收机的电磁保护,其任务包括建筑物中使用的所有调频(FM)、调幅(AM)和电视(TV)广播接收机的保护;另一个是针对其他电磁辐射可能对车、船运载工具的电磁干扰,即 WG2,重点是车载或船载接收机或其他电子设备的保护,其业务范围包括车、船上的电子

装置、车载无线电和电磁环境,制订车载 RF 噪声源影响车上和邻近电子设备的试验方法和限值。

(5) CISPR/E 无线电接收设备的干扰

(6) CISPR/F 家用电器、电动工具、照明设备及类似设备的干扰

(7) CISPR/G 信息技术设备的干扰

(8) CISPR/H 对无线电业务进行保护的发射极限

TC77

TC77 是 IEC 的电磁兼容技术委员会,它成立于 1973 年 6 月。它有一个 TE77 全会和 3 个技术分委员会 SC77A, SC77B, SC77C。它下设若干个工作组,但这些工作组的编号是不连续的,因为当某项工作任务完成后,该工作组即行撤销,这是与 CISPR 工作组的不同之处。下面对 3 个技术分委员会简介如下。

SC77A

其任务主要是在电磁兼容领域内从事低频现象(不大于 9 kHz)的标准化,目前有 5 个工作组:

(1) WG1 谐波及其他低频干扰

(2) WG2 电压波动及其他低频干扰

(3) WG6 低频抗扰度试验

(4) WG8 与网络频率有关的电磁干扰

(5) WG9 电力质量的测量方法

SC77B

其任务主要是在电磁兼容领域内从事连续的或瞬态的高频现象(不小于 9 kHz)的标准化,目前也有 5 个工作组:

(1) WG1 数字无线电话辐射抗扰度

(2) WG8 测量电磁场的探头和仪器的校准

(3) WG9 静电放电抗扰度

(4) WG10 辐射电磁场和由其感应的传导干扰的抗扰性

(5)WG11 传导干扰的抗扰性

SC77C

其任务主要是从事高空核电磁脉冲(HEMP)的研究。制定 HEMP 保护设备性能的标准及民用电工、电子设备和系统对 HEMP 抗扰度基础标准。目前有 1 个工作组:WG1HEMP 保护设备。

必须指出,在 EMC 领域,协调 CISPR、TC77 以及其他国际组织的组织机构是电磁兼容顾问委员会(Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility,ACEC)。ACEC 与 CISPR、TC77 已就标准制定的两个原则发表了联合政策声明(Joint Policy Statement)。

这两个原则是理解 TC77、CISPR 和各产品委员会工作大纲关系的核心。这两个原则是:

(1)CISPR 主要负责频率高于 9 kHz 的所有无线电通信保护设备的产品发射标准,低于 9 kHz 的发射主要由 TC77 负责;确定限值时,CISPR 和 TC77 要考虑特定产品的特性或安装实践,IEC 产品委员会以这些限值为依据制定发射标准,并且需要澄清一些问题时,向 TC77 和 CISPR 咨询。

(2)关于产品的抗扰度标准由有关的产品委员会负责,而 TC77 负责制定基础抗扰度标准。

第五节 电磁兼容国际标准

一、EMC 标准体系

EMC 标准体系分三个层次:基础标准、通用标准和产品标准。每个层次包含两方面标准:发射和抗扰度。详见图 1-1。

二、CISPR 标准简介

CISPR 标准将干扰源分为 6 大类,分别制定出干扰限值和测

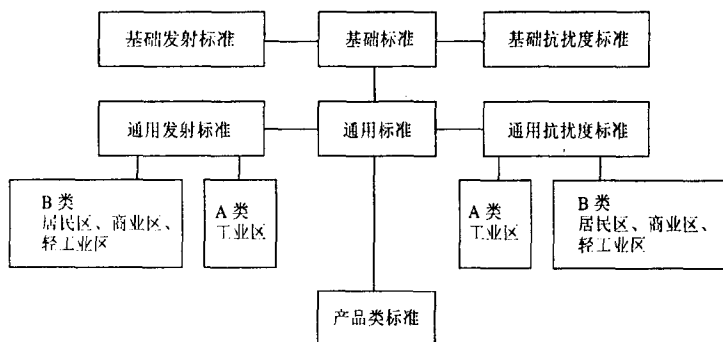


图 1-1 EMC 标准体系示意图

量方法,自成体系。参见表 1-1。

表 1-1 CISPR 标准系列

标准编号	名称	类别	制定者
CISPR10(1992-09)	CISPR 组织、规则和程序		CISPR
CISPR10-am1(1995-04)	第 1 修正案		(CIS)
CISPR11(1997-12)	工、科、医 (ISM) 射频设备电磁干扰特性限值和测量方法	产品类	SC CIS/B
CISPR12(1997-06)	车辆、机动船和火花点火发电机驱动装置无线电干扰特性的测量方法和限值	产品类	SC CIS/D
CISPR13(1998-08)	收音机和电视接收机及有关设备的无线电干扰特性测量方法和限值	产品类	SC CIS/E
CISPR14(1993-02)	家用和类似用途的电动、电热器具、电动工具的无线电骚扰特性测量方法和限值	产品类	SC
CISPR14-am1(1993-02)	第 1 修正案		CIS/F
CISPR14-am2(1998-12)	第 2 修正案		

续表

标准编号	名称	类别	制定者
CISPR14-2(1997-02)	电磁兼容 家用电器、电动工具和类似器具的要求 第二部分:抗扰度	产品类	SC CIS/F
CISPR15(1996-03) CISPR15-am1(1996-03) CISPR15-am2(1998-12)	荧光灯和照明装置无线电干扰特性的测量方法和限值 第1修正案 第2修正案	产品类	SC CIS/F
CISPR16-1Ed.1.1 (1998-01) CISPR16-1-am1 (1997-08)	无线电干扰和抗扰度测量设备规范和测量方法 第一部分 干扰和抗扰度测量设备 第1修正案	基础	SC CIS/A
CISPR16-2(1996-11)	无线电干扰和抗扰度测量设备规范和测量方法 第二部分 干扰和抗扰度测量方法	基础	SC CIS/A
CISPR17(1981-01)	无源无线电滤波器及抑制元件抑制特性的测量方法	产品类	SC CIS/C
CISPR18-1(1982-01)	架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性 第一部分 现象描述	产品类	SC CIS/C
CISPR18-2(1986-10) CISPR18-2-am1 (1993-04) CISPR18-2-am2 (1996-02)	架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性 第二部分 确定限值的测量方法和程序 第1修正案 第2修正案	产品类	SC CIS/C