

电磁兼容理论与应用技术丛书

# 电磁兼容试验技术

*DianCi JianRong ShiYan JiShu*

陈淑凤 马蔚宇 马晓庆 编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

《电磁兼容理论与应用技术丛书》

# 电磁兼容试验技术

陈淑凤 马蔚宇 马晓庆 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书是以现有国际、国内电磁兼容标准为基础,结合作者多年电磁兼容测试工作经验及部分科研成果编写而成。本书系统地阐述了电磁兼容试验原理及其相关内容。为使读者更好地了解电磁兼容试验,书中列举了大量的工程实例。

本书可供高等工科院校电类专业进行电磁兼容教学时参考,也可供电子工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容试验技术/陈淑凤等编著. - 北京:北京邮电大学出版社,2001.5

ISBN 7-5635-0490-7

I. 电… II. ① 陈… III. 电磁兼容性-试验-技术 IV. TN03-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 05369 号

---

### 电磁兼容实验技术

编 著 陈淑凤 马蔚宇 马晓庆

责任编辑 郑 捷

\*

北京邮电大学出版社出版发行

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京源海印刷厂印刷

\*

850 mm × 1168 mm 1/32 印张 8.5 字数 218 千字

2001年3月第1版 2001年3月第1次印刷

印数: 1—3 000 册

---

ISBN 7-5635-0490-7/TN·223 定价: 18.00 元

# 原

电磁兼容一般指电气及电子设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰，达到“兼容”状态。现在电磁兼容科技工作者又进一步探讨电磁环境对人类及生物的危害影响，学科范围已不仅限于设备与设备间的问题，而进一步涉及到人类本身，因此一些国内外学者也把电磁兼容学科称作“环境电磁学”。

当前，在有限的时间、空间及有限的频谱资源条件下，各种电气及电子设备的数量迅速增加，而家用电器的运用，更使这些设备遍及千家万户，用电设备密集程度越来越大，空间电磁环境恶化已成定局。特别是我国即将加入世界贸易组织，更需加强我国在国际市场上的竞争能力，为此，电磁兼容知识亟待宣传普及，同时研究开发电磁兼容新技术，采取行之有效的防护措施，以便使国人在高度享受物质文明及精神文明的同时，仍能确保社会生产生活能够得到良性的持续发展。

有鉴于此，北京邮电大学出版社及时组织我们编写了这套《电磁兼容理论与应用技术丛书》。丛书计有五个分册。第一分册主要对电磁环境、电磁兼容技术及相关学术组织机构作了简要的总体介绍，并对工频场的电磁兼容问题进行了深入的分析。第二分册主要是电磁兼容设计方面的内容，在介绍了电磁兼容基本原理的基础上，提出如何对设备产品进行电磁兼容预测，对可能出现的各种干扰进行了分析，并提出抑制干扰的各项措施。第三分册重点介绍了电磁兼容的试验场地、测量设备、测量仪器及详尽

的测量方法，对测量设备的计量校准及测试误差分析也进行了阐述。第四分册主要介绍国内外各项现行电磁兼容标准以及规范，对认证组织机构也有介绍。第五分册专就电磁环境对人类及生态的危害影响及相关防护措施进行了系统的论述。

该丛书由高攸纲教授任主编，由郭鹞及白同云两位教授任副主编，由他们对丛书的内容章节，进行了统一安排和审订。

丛书理论结合实际，可供大专以上水平的科技人员阅读参考，也可供电磁兼容研究领域的本科生及研究生用作辅助教材。

高攸纲  
2001年3月

# 前 言

面对今日的技术进步和现代市场经济的现实，电磁兼容技术已经形成一种产业，并在国民经济中发挥着重要的作用，创造着巨大的经济效益。电磁兼容试验技术作为电磁兼容领域的支撑技术，正在受到越来越多的关注。

基于对电磁兼容专业的执着和热爱，我们把多年来从事电磁兼容试验工作中的体会、理解和实践经验以及部分科研成果编撰成册，献给 21 世纪。本书的特点是通过列举大量工程试验例证，来说明电磁兼容测试原理及基本方法，努力做到深入浅出。

EMC 领域专家北方交通大学张林昌博士导师对该书给予了很高的评价：

电磁兼容是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下，各种用电设备或系统（广义的还包括生物体）可以共存，并不致引起性能降级的一门科学。电磁兼容是理论基础涉及数学、电磁场理论、电路基础、信号分析等的综合学科；而其应用范围又几乎涉及到所有用电领域。由于其理论基础宽、工程实践综合性强、物理现象复杂，所以在观察与判断物理现象或解决实际问题时，实验与测量具有重要的意义。正如美国肯塔基大学的 C. R. Paul 教授在一篇文章中所说：“对于最后的成功验证，也许没有任何其他领域像电磁兼容那样强烈地依赖于测量。”

在电磁兼容领域中，我们所面对的研究对象（主要指电磁噪声）无论时域特性还是频域特性都十分复杂。此外，由于研究对象的频谱范围非常宽，使得电路中的集中

参数与分布参数同时存在；近场与远场同时存在；传导与辐射同时存在。为了在国际上对这些物理现象有统一的评价标准和对研究的数据可以全球共享，对测量设备与设施的特性以及测量方法等均予以严格的规定是首要条件。这使得对电磁兼容测量的要求大大地提高了。

由于欧共体于1989年5月颁布了电磁兼容指令(89/336/EEC)。近10年来在国际上掀起了电磁兼容要求法规化、电磁兼容标准国际化的高潮。由于我国在质量技术监督部门、出入境检验检疫部门、环境保护部门等不断推出一些电磁兼容法规性文件或技术规范，加强了电磁兼容管理。这使得我国在近年来也掀起了“电磁兼容热”。许多部门与单位纷纷建设电磁兼容实验室，开展电磁兼容检测工作。在此大发展形势下，如何保证测量方法的正确性与测量结果的可信度，是当前所有电磁兼容实验工作者面对的重要课题。

由于以上三方面原因，迫切需要专门论述电磁兼容测量与测试的书籍。《电磁兼容试验技术》就是在这样背景下问世的。纵览本书，具有如下特点：

第一：三位作者都是在电磁兼容测量领域第一线的科技工作者，在实践中积累了丰富的经验。因而本书的内容深入浅出，许多数据都是出自作者本人的实验工作，这一特点对于有关试验技术的专著是十分必要的，也是保证此书质量的基本条件。

第二：对于电磁兼容实验室建设的有关内容，在本书的第三章中给予了专门的论述，并附有一批实物照片。这对于实验室建设及对有关设施的技术评价是至关重要的。

第三：除了电磁骚扰与抗扰度的基本测量内容外，本书还纳入了对系统的电磁兼容测量以及一批与电磁兼容相关的参数的测量方法。如天线耦合度、滤波器、互调与交

调的测试等等。这不仅是电磁兼容工作者经常遇到的问题，也是保证系统内与系统间的电磁兼容所不可或缺的。

测试领域的专家解释：“测量”（Measurement）是用一定的仪器或工具测定某一参数或指标；“测试”（Test）则更多关心的是某一参数的变化或响应；“试验”（Experiment）是根据一定目的，运用必要手段，在人为控制条件下，观察事物本质和规律的一种实践活动。鉴于这种考虑，我们把书名定为电磁兼容试验技术，它包含所有的电磁兼容测量、测试活动。全书内容作如下安排：第3，4，5章介绍符合电磁兼容标准要求的试验场地条件：电磁兼容屏蔽暗室、GTEM小室和开阔场。第6，7章介绍符合电磁兼容标准的规范的电磁兼容测量设备和测量方法。第8章介绍适合于工程研制和产品开发的有关电磁兼容预测试技术。第9章介绍系统级电磁兼容性测试方法和注意事项。第10章介绍一些目前电磁兼容标准尚未能完全包含的，与电磁兼容性相关的一些测试内容。第11章介绍与电磁兼容测量技术相匹配的计量知识和误差分析。为更好地掌握上述内容，我们在第1，2章阐述了与电磁兼容试验技术有关的一些基本知识。

第1，2，3，8，9，10章由陈淑凤撰写；第6，7，11章及3.4节由马蔚宇撰写；第4，5章由马晓庆撰写；纪鸣浩和孙勤奋提供了一些有关实验室素材。由于水平有限、时间仓促，本书不妥之处，敬请批评指正。

冯桂山、郝修来、孙琉方、张华担任部分校对工作，牛俊、张正光等同志对本书编撰工作给予了很大帮助，在此一并感谢。

作者

2001年1月15日



# 目 录

## 1

### 绪 论

1.1	EMC 试验技术的发展 .....	1
1.2	EMC 试验在 EMC 学科中的重要位置 .....	6
1.3	EMC 测量标准 .....	8
1.4	EMC 试验结果评价 .....	15

## 2

### EMC 基础知识

2.1	电磁干扰与电磁敏感度 .....	20
2.2	测量值单位 .....	22
2.3	测量接收机检波方式 .....	25
2.4	频域测量带宽选择 .....	26
2.5	测量接收机灵敏度 .....	28
2.6	测量接收机过载问题 .....	29
2.7	测量值准确度 .....	29
2.8	天线系数 .....	30
2.9	电磁环境电平 .....	34

3

## EMC 实验室

3.1	EMC 实验室设计要求 .....	37
3.2	EMC 实验室设计方案 .....	38
3.3	EMC 实验室工程实施 .....	46
3.4	EMC 实验室验收 .....	49
3.4.1	屏蔽效能测试 .....	50
3.4.2	场地衰减测试 .....	61
3.4.3	场均匀性检测方法 .....	66
3.5	EMC 实验室管理 .....	68
3.6	EMC 实验室实例 .....	70
3.6.1	欧洲最大的 EMC 测试中心 .....	70
3.6.2	一个典型的无线通信产品 EMC 实验室 .....	72

4

## GTEM 横电磁波传输小室

4.1	GTEM 横电磁波传输小室概述 .....	76
4.2	基本结构与原理 .....	77
4.3	时域阻抗分析 .....	79
4.4	电压驻波比测量 .....	80
4.5	GTEM 小室内电磁场分布 .....	81
4.6	GTEM 组成电磁辐射敏感度测试系统 .....	82
4.7	GTEM 组成电磁辐射干扰测试系统 .....	83
4.8	测试系统误差分析 .....	84

## 5

## 开阔试验场地

5.1	开阔试验场地概述 .....	86
5.2	开阔试验场的基本结构 .....	86
5.3	归一化场地衰减 .....	87
5.4	归一化场地衰减测试 .....	89
5.5	开阔试验场的应用 .....	91

## 6

## EMC 测量设备

6.1	电磁干扰测量设备 .....	92
6.1.1	测试接收机 .....	92
6.1.2	电磁干扰测试附件 .....	98
6.1.3	测量系统及测量软件 .....	114
6.2	电磁敏感度测量设备 .....	116
6.2.1	模拟干扰源 .....	116
6.2.2	功率放大器 .....	124
6.2.3	功率计 .....	126
6.2.4	大功率定向耦合器 .....	127
6.2.5	传感器 .....	128
6.2.6	敏感度测量天线 .....	132
6.2.7	敏感度测试系统及测量软件 .....	133

## EMC 测量方法

7.1	EMC 测试简介 .....	136
7.1.1	测试的目的及分类 .....	136
7.1.2	测试的一般步骤 .....	138
7.2	EMC 测试准备 .....	140
7.2.1	试验场地条件 .....	140
7.2.2	环境电平要求 .....	140
7.2.3	试验桌 .....	141
7.2.4	测量仪器和被测设备的隔离 .....	142
7.2.5	敏感性判别准则 .....	142
7.2.6	被测设备的放置 .....	142
7.3	传导发射测试 .....	143
7.3.1	测试布置 .....	143
7.3.2	测量方法 .....	144
7.4	辐射发射测试 .....	148
7.4.1	测试布置 .....	148
7.4.2	测量方法 .....	149
7.5	传导抗扰度测试 .....	151
7.5.1	概述 .....	151
7.5.2	测量设备 .....	152
7.5.3	传导抗扰度测试方法 .....	153
7.6	辐射抗扰度测试 .....	159
7.6.1	概述 .....	159
7.6.2	测量设备 .....	159
7.6.3	辐射抗扰度测试方法 .....	160

7.6.4 静电放电抗扰度测试方法 .....	163
-------------------------	-----

## 8

**EMC 预测试**

8.1 EMC 预测试在产品研制过程中的重要性 .....	165
8.2 EMC 预测试设备 .....	167
8.3 EMC 预测试方法 .....	170
8.4 EMC 预测试实例 .....	173
8.5 EMC 加固辅助测试介绍 .....	179

## 9

**系统级 EMC 试验**

9.1 基本概念 .....	182
9.2 系统级 EMC 试验的必要性和复杂性 .....	186
9.3 系统级 EMC 试验要求 .....	188
9.4 系统级 EMC 试验内容 .....	191
9.4.1 系统总装过程中的接地电阻和搭接电阻测试 .....	191
9.4.2 电源线上传导干扰检测 .....	195
9.4.3 系统自兼容试验 .....	196
9.4.4 系统电磁环境试验 .....	198

## 10

**与 EMC 相关的测试**

10.1 频率特性测试 .....	200
-------------------	-----

10.2	电缆屏蔽效能测试 .....	202
10.3	电磁环境测试 .....	207
10.4	天线耦合度测试 .....	209
10.5	电磁干扰滤波器测试 .....	213
10.6	三阶互调特性测试 .....	216
10.7	互调传导敏感度测试 .....	218
10.8	交调传导敏感度测试 .....	221
10.9	无源互调产物测试 .....	223
10.10	空间微放电现象测试 .....	229

## 11

### 计量知识与误差分析

11.1	仪器设备的校准 .....	234
11.1.1	测量接收机的校准 .....	234
11.1.2	天线的校准 .....	236
11.1.3	传感器的校准 .....	241
11.1.4	脉冲源的校准 .....	246
11.2	测试系统的校准 .....	247
11.3	测试误差的分析 .....	249
11.3.1	几个基本概念 .....	249
11.3.2	EMC 测试的误差来源 .....	251
<b>参考文献</b> .....		254

# 1

## 绪 论

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility,以下简称 EMC)技术是以电磁场理论为依据,以近代统计学和计算机为手段,以试验为基础,涉及到众多技术领域的一门综合性系统工程。面对今日的技术进步和现代市场经济的现实,EMC 技术已形成一种产业。本章介绍了 EMC 试验技术的发展历史和未来展望,指出 EMC 试验技术在 EMC 技术领域占据重要位置,它随着 EMC 技术的发展而发展,并成为 EMC 产业的支撑技术。推荐通过学习 EMC 测量标准、EMC 测量原理以及评估测量结果的方法来掌握 EMC 试验技术。

### 1.1 EMC 试验技术的发展

EMC 技术是在认识电磁干扰、研究电磁干扰和控制电磁干扰的过程中发展起来的。第一篇题为“论无线电干扰”的文章发表于 1881 年,距今已有 100 多年。1887 年德国的电气工程师协会成立了干扰问题研究委员会。1904 年国际电工委员会(IEC)成立。1934 年国际无线电干扰特别委员会(CISPR)成立。IEC 和 CISPR 是典型的有代表性的国际组织,其目的是促进电气、电子及有关技术领域的所有标准化问题及其他有关问题上的技术合作。从那时起,就开始了对电磁干扰问题进行世界性有组织地研究。但是,EMC 作为电子学中独立的一个分支,还是第二次世界大战以后的事情。

EMC 试验技术是 EMC 技术领域研究的重点课题。早期的

EMC 测试处于电磁干扰诊断阶段。当时的电子系统工程,一般是先进行设计、加工、总装调试,有些问题往往在系统联试中才能发现。检测手段通常使用通用电子仪器设备,如早期生产的示波器和频谱分析仪等。称这个阶段的 EMC 技术处在发现问题、解决问题的初级阶段。

科学实践使人们认识到:要使一些电子、电气设备共存于一个有限空间,并能正常运行,实现各自的功能,必须事先对这些设备进行某种约定,即确定 EMC 指标和相应的检测办法。于是,人们在实践中花费大量精力研究、制定了各种 EMC 标准。这些标准规定了电磁干扰的极限值,也规定了测量方法。这时 EMC 技术已进入标准规范法阶段。此阶段配套的电子设备得到了进一步发展。下面通过一些事例来说明。

第二次世界大战后,美国各军、兵种为各自的需要,对属于该领域的设备制定各自的 EMC 要求。需要研制的设备是多种多样的,与之相关的 EMC 标准规定的极限值差别比较大,要求的测试方法不尽相同,配备的测试设备也不一样。有时发现按某一 EMC 标准要求设计的设备,不一定能满足另一标准的要求。因此,常常出现欠设计或过设计。这就给制定标准的人提出了一个非常现实的问题,即制定一些新标准来统一名目繁多的标准,供三军使用。

1965 年,美国国防部组织三军的工程技术人员和标准化研究人员制定了一个研究电磁干扰专用术语、测试范围、测试方法及设备要求的计划。这就是美军标 MIL-STD-460 系列产生的时代背景。美军标从第一次发布至今已经历了 30 多年的历程,先后公布了五个版本。每个版本对测试方法和测试设备的要求都有一定的改进。与此同时,测试仪器设备的研制也取得了重大突破,形成了比较完善的测试系统,并逐步由手动测试变成自动测试;EMC 专用测试软件也随计算机操作系统的发展逐步升级。目前军品 EMC 测试已成为非常规范化的标准测试。



同一时期, CISPR 和 IEC 等组织也先后制定了一系列 EMC 标准, 对试验场地、测试设备、测试方法等作了具体规定, 并针对各种电子、电气产品制定了相应比较详细的标准要求。这些要求既是产品设计师进行设计的指南, 也是 EMC 测试人员进行 EMC 测试, 并用来判断产品是否合格的依据, 有些标准直接用于指导测量。例如 CISPR11 关于“工业、科学、医疗射频设备的无线电干扰限值 and 干扰特性测试方法”(已等效成国标 GB4824—1996), CISPR22 关于“信息技术设备的无线电骚扰的测量方法和限值”(已等效成国标 GB9254—1998)等。又如 IEC61000-4 系列关于测试与测量技术等, 也有对应的国家标准。在多年试验经验的基础上, 这些标准经多次修订已经比较成熟。为了使各个国家、各个实验室的测试结果有可比性, 还专门制定了关于 EMC 测试仪器设备的技术指标作了较为详细的统一定义和规定。

近些年来, 一些技术发达国家已逐步向 EMC 技术发展的新阶段——系统设计法阶段——发展。系统设计法是指电子设备或系统在进行电设计以前, 运用电磁场理论分析和计算方法以及相关数据来预测系统内的电磁环境, 在电性能和 EMC 同步设计中对 EMC 标准进行剪裁, 根据预估的电磁环境下达设备、分系统 EMC 设计指标, 使设备或系统实现最佳设计。美国波音飞机公司声称按 EMC 预测结果设计的系统有 90% 以上可以直接达到电磁兼容。美国国家标准局(NBS)承担 EMC 测试设备的计量及场强量值校准, 对测试设备进行认证, 并开展对噪声射频干扰的仲裁工作。美国国防部马里兰州的“EMC 分析中心”负责向各军种提供所需的电磁环境数据和快速分析。应该说 EMC 试验技术已实现了将测试数据用于指导新的设计的飞跃。

国际上具有权威的世界贸易组织 WTO 在 WTO/TBT 协议中规定了签字国必须依照国际标准或其中有关部分制定自己的技术法规和标准, 但涉及国家安全需要, 对欺骗性作法的防范, 对人类健