黑龙江省精品图书出版工程

舰 | 船 | 现 | 代 | 化

电磁兼容性原理（第二版）

周开基　赵　刚　编著

HEUP 哈爾濱工程大學出版社

黑龙江省精品图书出版工程

电磁兼容性原理

（第二版）

周开基　赵　刚　编著

HEUP 哈爾濱工程大學出版社

内容简介

本书主要内容包括电磁兼容基本原理和概念、电磁兼容预测和分析方法、电磁干扰控制技术、电磁兼容测量与试验技术、电磁兼容标准。

全书归纳了电磁兼容学科近年来新进展和前沿课题，内容翔实，论述清晰，说理透彻，紧密结合工程实际。

本书可供高等工科院校电子、电气工程专业研究生及相关专业人员参考使用。对于从事电子、电气工程的科技人员也是一本系统、实用的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容性原理/周开基，赵刚编著. —2 版. —哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2016. 1
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1189 - 0

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①周… ②赵… Ⅲ. ①电磁兼容性 Ⅳ. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317036 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社　　址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传　　真 0451 - 82519699
经　　销 新华书店
印　　刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开　　本 787mm × 1 092mm　1/16
印　　张 28. 5
字　　数 729 千字
版　　次 2016 年 1 月第 2 版
印　　次 2016 年 1 月第 2 次印刷
定　　价 160. 00 元
http://www. hrbeupress. com
E-mail: heupress@ hrbeu. edu. cn

第一版前言

电磁兼容性是一门跨学科的工程实践性强的年轻学科，在我国仅有几十年的历史。它主要研究电子、电气设备之间，它们与环境之间的兼容性，它的理论是建立在电磁场理论、电路理论的基础上。电子、电气设备既是依靠电磁能工作，当它们在一起时相互间的电磁耦合是避免不了的；电子设备总处于一个空间环境内，它们与环境之间也存在电磁能量的耦合，要保证电子设备与其他设备、与环境兼容地运行是一项困难的事情。随着电子技术不断发展，电磁频谱资源与物理空间都是有限的，电磁兼容（EMC）将是一个愈来愈复杂而又无法回避的问题。本书主要从 EMC 这门学科的基本原理，主要的研究领域和基本的方法上作一个全面、深入的阐述。EMC 在国外已有半个世纪以上的发展历史，其研究领域主要是在 EMC 预测与分析、电磁干扰（EMI）的控制技术、EMC 测量与试验、EMC 标准与规范四个方面。本书第 1 章综述 EMC 的发展历史、EMC 的基本概念、主要研究领域；第 2 ~ 4 章阐述 EMC 预测的基本方法，包括传导和辐射的机理与预测模型、场 - 线耦合机理与模型、计算电磁学（矩量法、时域有限差分法、有限元法、高频法等）在 EMC 预测中的应用；第 5 ~ 10 章研究经典的 EMI 控制技术（接地、屏蔽、滤波）、光纤通信系统中的 EMC、静电放电（ESD）和频谱利用；第 11 章研究 EMC 测量技术；第 12 章阐述 EMC 标准，第 13 章给出本书理论的几个工程应用示例。EMC 由于是横断学科，涉及范围非常广泛，近年来国内有不少 EMC 的书籍出版，本书立足于选取国内外 EMC 近十年来的最新进展作为素材，并且在阐明原理、概念的基础上紧密结合工程应用的问题。限于篇幅，对一些 EMC 的常用方法和一般概念就不一一罗列，读者可从很多 EMC 著作和手册中查阅。

本书由周开基和赵刚编著，各章节分工如下：第 1 章赵刚；第 2，3，5 章，11 章 11.4 ~ 11.5 节，12 章及 13 章 13.1，13.4，13.5 节周开基；特邀东南大学计算电磁学研究中心徐金平、崔铁军、洪伟三位教授编写了第 4 章；第 6，7，8 章及 11 章 11.1 ~ 11.3 节张坤元；第 9 章郑生全；第 10 章李国成；第 11 章 11.3 ~ 11.6 节王海婴；第 13 章 13.2 ~ 13.3 节王荣成。参加全书统稿的有邹忠栾、宋东安、宋文武、易学勤。施海峰担任全书初稿的文字录入和插图工作。

限于时间仓促，水平有限，书中会有不少疏漏甚至谬误，恳请国内各位同行不吝指教。

编著者

2002 年 8 月

再版前言

本书初版至今已12年了，国内外电磁兼容性学科又发展了一大步。编者近十年来主要在陕西海泰电子公司从事电磁兼容产品的开发研究。本修改版在初版的基础上作了小部分的增删，需要说明的是，增加部分主要是结合十年来与海泰电子公司同仁们共同开发的电磁兼容产品，这些成果是在郭恩全总经理的正确决策和亲自主持下，海泰电子公司的近50人的电磁兼容团队的艰苦努力下取得的。修改版是在哈尔滨工程大学出版社的大力支持下得以完稿，在此向该出版社表示衷心的感谢。

编著者

2014年6月

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

目　　录

第 1 章　导论 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　EMC 标准与规范 …… 1
1.3　EMC 测试与试验技术 …… 4
1.4　EMC 仿真技术 …… 4
1.5　EMI 抑制与 EMC 设计 …… 5
第 2 章　系统电磁兼容性预测分析 …… 6
2.1　引言 …… 6
2.2　系统间 EMC 预测分析技术 …… 7
2.3　系统内 EMC 预测分析技术 …… 20
2.4　海泰公司 EMC 预测分析软件与 EMC 数据管理及应用系统 …… 51
第 3 章　计算电磁学在电磁兼容中的应用 …… 64
3.1　引言 …… 64
3.2　矩量法 …… 66
3.3　快速算法 …… 84
3.4　时域有限差分法 …… 97
3.5　有限元方法 …… 106
3.6　高频方法 …… 129
第 4 章　接地设计 …… 147
4.1　引言 …… 147
4.2　电击危害的控制——安全地 …… 147
4.3　干扰的控制——信号地 …… 153
4.4　设备和系统的接地设计 …… 157
4.5　应用示例 …… 160
第 5 章　屏蔽设计 …… 165
5.1　引言 …… 165
5.2　简单屏蔽的设计数据 …… 165
5.3　屏蔽效能计算公式综述 …… 169
5.4　屏蔽体不完整性的影响与克服的方法 …… 171
5.5　导线的屏蔽 …… 174
5.6　有选择性的屏蔽设计 …… 179
5.7　屏蔽体的接地 …… 180
5.8　通风波导窗设计 …… 180
5.9　导电衬垫 …… 185

5.10 屏蔽用金属网 …… 194
第6章 滤波器的设计与应用 …… 196
6.1 引言 …… 196
6.2 L型滤波器 …… 197
6.3 π型滤波器 …… 198
6.4 T型滤波器 …… 199
6.5 决定滤波器形式的一些准则 …… 200
6.6 EMI电源滤波器的选用 …… 200
6.7 EMI电源滤波器使用的注意事项 …… 201
6.8 常用的滤波器电路原理图 …… 201
6.9 滤波器产品 …… 202
6.10 整改案例 …… 208
第7章 光纤通信系统的EMC …… 218
7.1 引言 …… 218
7.2 光纤的分类和特性 …… 218
7.3 光纤的基础知识 …… 222
7.4 光通信系统中的本征噪声源 …… 228
7.5 光通信系统中的电磁干扰(EMI) …… 240
7.6 简单分析金属线飞行系统中的光纤应用 …… 246
第8章 静电放电 …… 257
8.1 引言 …… 257
8.2 静电放电过程 …… 257
8.3 ESD的电流波形和辐射场 …… 260
8.4 ESD的威胁机理 …… 268
8.5 ESD的基本防护和控制 …… 269
8.6 ESD测试程序 …… 276
第9章 频率指配和频谱保护 …… 280
9.1 引言 …… 280
9.2 电磁频谱 …… 282
9.3 频率的划分和频率的指配 …… 284
9.4 频谱保护方法 …… 297
9.5 综述 …… 305
第10章 EMC测量 …… 306
10.1 引言 …… 306
10.2 主要的EMC测量设施 …… 306
10.3 EMC测试设施的理论和设计 …… 307
10.4 EMC测试环境和测量不确定度 …… 330
10.5 利用EMC测试设施 …… 338

第 11 章　EMC 标准 …… 346
11.1　引言 …… 346
11.2　民用 EMC 标准 …… 346
11.3　军用 EMC 标准 …… 373
第 12 章　EMC 工程应用示例 …… 396
12.1　分散接地对辐射发射的影响 …… 396
12.2　长距离传输线的场耦合 …… 398
12.3　设施的电磁脉冲防护 …… 403
12.4　没有进行 EMC 设计引起的核设施中的误报 …… 406
12.5　手机的近场场强计算 …… 408
参考文献 …… 445

第1章 导 论

1.1 引 言

电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility,EMC)是指电子和电气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设备都能正常工作而互不干扰,达到"兼容"状态。

EMI(Electromagnetic Interference)——电磁干扰;

EMS(Electromagnetic Susceptibility)——电磁敏感度。

如用一个公式表示,可为:

$$EMC = EMI + EMS$$

EMC 是一门新兴的交叉学科,经历了半个多世纪,其研究范围通常分为以下四个领域:

- EMC 测试与试验技术;
- EMC 标准与规范;
- EMC 预测与仿真技术;
- EMI 抑制与 EMC 设计。

1.2 EMC 标准与规范

EMC 标准与规范的重要意义在于为电子和电气产品的进入市场或军用采购制定一个合格判据,一个合格底线。它规定如果过严将不必要地增加了产品的成本,如果过松了则不能很好满足使用要求。世界先进国家如美、英等国都集中最有学术造诣、经验最丰富的 EMC 专家从事 EMC 标准与规范的编制。作为一个实用性非常强的新学科,标准与规范成为 EMC 学科一个十分重要的研究领域。它又分为标准测试方法和测试原理研究,标准限值制定研究两个分领域。

1.2.1 标准测试方法

世界先进国家在 EMC 标准的测试方法研究上已有半个世纪以上的历史,尤以美国的研究水平最高。美国在 20 世纪 50 年代就制定了军品的设备级和系统级 EMC 测试方法标准,不少国家均借鉴美军标来制定本国 EMC 军标。在民品的设备级 EMC 测试方法上,IEC 的 CISPR 针对各类设备制定了通用和专用相结合的测试方法标准。总的说来,国际上对军品或民品,设备级 EMC 测试方法上基本原理是一致的。

在本章第 1 节中已提到,EMC 包括 EMI 和 EMS 两方面。要全面评价一台设备的 EMC,对其 EMI 应从辐射发射(Rediated Emission,简写为 RE)和传导发射(Conducted Emission,简写为 CE)两种渠道去评定。在 EMS 方面也应从辐射敏感度(Radiated Susceptibility,简写为 RS)和传导敏感度(Conducted Susceptibility,简写为 CS)去评定。因此对一台设备,不论军

标或民标,均从 RE,CE,RS,CS 四方面去评定,军标与民标的主要区别有两点:一点是两者在测试天线(发射天线或接收天线)与被测件的距离,军标规定为 1 m,民标规定为 10 m 或 3 m。另一点是两者的测试频率范围,军标规定的较宽,如美军标规定为 30 ~ 40 Hz,民标规定的较窄,如 CISPR 标准规定为 9 kHz ~ 1 GHz(近年来有的标准扩至 6 GHz 或 12 GHz)。

我国军标等效采用美军标 M1L - STD - 461F - 2007,规定对三军设备统一采用共计 19 项 EMC 测试(见表 1 - 1)。

表 1 - 1 电磁发射和敏感度要求项目

项目	名称
CE101	25 Hz ~ 10 kHz 电源线传导发射
CE102	10 kHz ~ 10 MHz 电源线传导发射
CE106	10 kHz ~ 40 GHz 天线端子传导发射
CE107	电源线尖峰信号(时域)传导发射
CS101	25 Hz ~ 50 kHz 电源线传导敏感度
CS103	15 kHz ~ 10 GHz 天线端子互调传导敏感度
CS104	25 Hz ~ 20 GHz 天线端子无用信号抑制传导敏感度
CS105	25 Hz ~ 20 GHz 天线端子交调传导敏感度
CS106	电源线尖峰信号传导敏感度
CS109	50 Hz ~ 100 kHz 壳体电流传导敏感度
CS114	10 kHz ~ 400 MHz 电缆束注入传导敏感度
CS115	电缆束注入脉冲激励传导敏感度
CS116	10 kHz ~ 100 MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度
RE101	25 Hz ~ 100 kHz 磁场辐射发射
RE102	10 kHz ~ 18 GHz 电场辐射发射
RE103	10 kHz ~ 40 GHz 天线谐波和乱真输出辐射发射
RE101	25 Hz ~ 100 kHz 磁场辐射敏感度
RS103	10 kHz ~ 40 GHz 电场辐射敏感度
RS105	瞬变电磁场辐射敏感度

其中 CE 有 4 项,RE 有 3 项,CS 有 9 项,RS 有 3 项。

民标按表 1 - 2 所列,可分为十大类设备,除集成电路我国尚无对应的国标外,其余 9 类均有相应的国标与国际标准对应(基本是等效采用国际标准)。尽管这十大类民用设备的 EMC 测试项总数在 100 项以上,但均可分为 CE,RE,CS 和 RS 四类,测试方法也基本与军标大同小异。

以上是设备级 EMC 测试方法,至于系统级 EMC 测试,美军标 M1L - STD - 464C - 2010 全面规定了评价军用系统的 EMC 的 15 个要素,提出了系统 EMC 要求,但该标准未涉及系统 EMC 的测试方法,这可能是由于三军(海、陆、空)系统千差万别,很难规定一个统一的测试方法。我国军工研发、生产部门针对各自研发的军用系统,根据 GJB1389A—2005“系统

电磁兼容性要求”，制定了航天、航空、船舶等行业的系统级 EMC 测试标准，各行业采用的系统级 EMC 测试方法不尽相同。

表1-2 民用设备 EMC 标准

序号	产品类别	国际标准	我国标准
1	工、科、医射频设备	CISPR11，1990(EMI)	GB4824-96
2	通信设备		YD/T 1032
3	信息技术设备	CISPR22，1997(EMI) CISPR24，1997(EMS)	GB9254-1998\ GB1768-98
4	汽车	CISPR 12/21/25	GB14023-92/ GB/T 17619-98
5	广播、电视	CISPR13，1996(EMI) CISPR20(EMS)	GB13837-98 GB9383 GB/T 13838 GB/T 13839
6	电照明	CISPR15，1996(EMI)	GB17743-99
7	架空电力线和 变电站低压供电系统	CISPR18(EMI)	GB15707-95
8	家用电器、电动工具	CISPR14，1993	GB15707-95
9	轨道交通、电力车辆	SAEJ551/5(EMI)	GB4343-84
10	集成电路	IEC61967(EMI) SAEJ1752(EMI) IEC62132(EMS)	GB/T 18387-2001

1.2.2 标准限值的制定

标准限值的制定是一项复杂的系统工程，它涉及设备的 EMI 与 EMS 的相关与协调，涉及设备与环境的相关与协调，要考虑科学与合理，又要考虑实现的可能性与成本。而且要在标准的改版与升级中不断调整与修改来实现最优化。对于不同测试项的限值之间是否矛盾也需全面酌酌考虑。美军标 M1L-STD-461F-2007 的应用指南给出了 19 个测试项的限值制定原理。

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

1.3 EMC 测试与试验技术

EMC 测试与试验技术研究包括测试环境的标准化问题和测试与试验的新原理研究。

1.3.1 EMC 测试环境

对一台电子和电气设备的 EMC 测试必然是要将该设备置于一定的环境中,这样一来,测试既涉及被测设备的发射与响应,也不可避免也涉及测试环境的影响。在 20 世纪六七十年代,城乡的电磁环境还是比较干净的,因此在测试设备的 EMI 时,可以在开阔场地进行。随着广播、电视、无线电通信的迅速发展,城乡空间的电磁环境日益恶化,因此在开阔场已无法精确地测试设备的 EMI。在这种情况下标准才规定必须在屏蔽室,进而必须在屏蔽暗室内进行 RE 和 CE 的测试。

美国在 40 多年前就开始研究电磁混响室,通过深入的理论和实验研究,发现混响室在大多数情况下可以取代屏蔽暗室,除了在 RS 测试,还可在 RE 测试上取代暗室。

1.3.2 EMC 测试新原理研究

半个多世纪以来,对 EMI 的测试一直是采用超外差接收机对被测设备的 EMI 做频率扫描,得到其 EMI 的频谱分布曲线。近年来开始出现测试 EMI 的时域接收机,它首先在时域上捕捉被测设备的 EMI 特性,然后基于数字信号处理(DSP)技术,通过快速傅立叶变换(FFT)由时域特性转换为频域特性,同样可得到 EMI 的频谱分布,而测试速度此频扫接收机快 2 000 倍以上。

在系统级 EMC 测试上要实现高场强辐射敏感度一直困扰着电磁兼容学界。经过英国等国 40 多年的研究,发现采用低电平扫描法可以克服这个困扰。此方法在 RS 测试上以 400 MHz 作为分界频点,在此频率以下,通过低电平照射被试系统,在系统的关键线束上监测感应电流,从而获得辐射场强与线束上感应电流的相关函数,即在所关心的频率(0.2 MHz ~400 MHz 频段内)单位场强所感应的电流值,然后线性外推法得到实际的高场强下的感应电流值,再采用 BCI(束电流注入)法在关键线束上注入此感应电流值,这可等效于高场强对系统的辐射照射。这在理论上和实验上均充分证实两者的等同。在 400 MHz 以上频率这种等效性就不存在了,此时采用低电平场强测试系统测试屏蔽壳体(如飞机机身,方舱的外壳)的屏蔽效能及壳体内的射频传输损耗,然后对屏蔽壳体内的设备只需用实际的高场强减去此屏效与传输损耗之和后的值去进行设备的 RS 测试即可。以上这两个频段的低电平扫描法的成本要比传统的高场强照射法要低得多。

1.4 EMC 仿真技术

EMC 仿真是 EMC 学科四个主要研究领域中开展时间最短的一个领域,国外先进国家(以美国为首)也只有 40 年左右,国内还不到 30 年,真正广泛关注与投入研发也只是近 10 年。从国外在 EMC 仿真(一些 EMC 刊物和学术会上更多是称为 EMC 预测与分析)方面的主要研究集中在:系统内 EMC 预测分析、系统间 EMC 预测分析,天线布局性能优化三方面。

第一方面涉及面最广，主要用于复杂的电子、电气系统的 EMC 设计性能评估，系统内设备 EMC 指标分配。第二方面涉及多个大系统之间的 EMC 预测，此时系统间 EMI 主要是收发设备通过空间辐射的耦合方式，因此只涉及射频收发设备及天线、传播等。第三方面涉及一个平台（如一架飞机、一艘军舰、一部战车）上多副收发天线的布局，平台内 EMI 最为关心的是收发设备通过天线产生的 EMI，最为棘手的是平台的电磁散射体（如机身、舰船上层建筑、战车车身）的散射模型的建模，它对平台上天线的辐射近场、天线阻抗、天线远场方向备、天线间耦合度的影响。EMC 仿真的核心是上述三方面的数学模型的建模。系统内各设备的有用信号（设计参数）是已知的。一个设备的有用信号在 EMC 仿真中可能是构成对其他设备的 EMI。另外，各设备的无用信号，即其产生的辐射发射和传导发射更是构成对其他设备的 EMI 来源。而这个 EMI 源是很难建立数学模型的，国外通用的做法是采用设备级 EMC 的实测数据，经统计学方法处理后放在 EMC 数据库中，作为系统 EMC 仿真的原始数据。如美国在 20 世纪 70 年研制出航空、航天、舰船等系统 EMC 仿真软件的同时，在国防部下属的 EMC 分析中心（ECAC）建立了三军共用的 EMC 数据库，将三军定型列装的设备的 EMC 测试数据经统计学方法处理后输入此数据库，三军各部门仿真需要时，经 EMC 分析中心批准后调用有关测试数据。

1.5 EMI 抑制与 EMC 设计

当 EMC 仿真发现已有设计存在 EMC 缺陷，不能满足 EMC 标准与规范限值要求，或在产品生产出来进行 EMC 测试发现存在 EMC 问题时，需要进行 EMC 整改，采取 EMI 抑制措施。传统的抑制措施包括屏蔽技术、滤波技术、接地技术、干扰隔离去耦技术等。对设备和系统进行 EMC 设计是以达到 EMC 标准与规范要求为目的，采用 EMC 仿真或其他方式预估，采取 EMI 抑制措施，通过 EMC 测试和试验来检验和评定。一个产品（设备、系统）的 EMC 设计是一项复杂的系统工程，它包括大量的技术工作，也包括繁复的管理工作。国外和国内的实践经验表明，对一个复杂系统的 EMC 工作，首先要成立包括使用方、承制方在内的 EMC 专家组，要编制项目的 EMC 大纲，在系统全寿命期各节点对 EMC 工作进行监控和管理，使 EMC 设计管理流程化。

第 2 章　系统电磁兼容性预测分析

2.1 引　　言

2.1.1　研究系统电磁兼容性的意义

这里讨论的系统是指包含多台电子设备、电气设备和机电设备的集合体，它们共置于一个有限空间内，相互之间存在空间电磁场耦合，也可能存在互连电导体的传导电磁耦合。它们往往位于一个平台上，如在一架飞机、一艘舰船、一辆战车、一个移动通信基站上。它们的有用信号和无用的干扰占用的频谱从音频、中低频、高频到超高频，即从 20 Hz ~ 40 GHz。其中敏感设备的响应电平可能低至微伏级，发射设备的输出电平可能高至兆瓦级。

对一个系统，它的电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility，简写为 EMC）是指组成系统的每台设备既不要产生过大的电磁干扰（Electromagnetic Interference，简写为 EMI）影响其他设备的正常运行，又应有一定的承受其他设备干扰的能力或抗扰度（Immunity）。

由于现代电子、电气、机电设备越来越复杂，要实现一个系统的 EMC 绝非易事。而一旦存在系统的 EMC 问题，系统的主要技术指标必然受到很大影响，甚至不能正常运行。这里举一个实例。在 20 世纪 90 年代英阿的马岛之战中，英国驱逐舰“谢菲尔德”号舰长在与国内通信时为了避免雷达干扰通话而下令关闭该舰雷达，恰恰在此时阿根廷发射的“飞鱼”导弹从低空进入，击沉该舰。这正是由于该舰 EMC 存在问题：无线电通信系统与低空警戒雷达不能兼容工作。“谢菲尔德”事件传到美国，美国反思自己的海军舰艇也可能存在类似问题，从而掀起一场“EMC 运动”。

2.1.2　系统 EMC 的标准

世界上一些先进国家从 20 世纪 60 年代就开始制定系统 EMC 标准，如美国第一个系统 EMC 标准 MIL - E - 6051《系统电磁兼容性要求》就是 1950 年 3 月颁布的。1997 年颁布了 MIL - STD - 464《电磁环境效应》取代了 MIL - E - 6051 及另外 3 个系统 EMC 标准：MIL - STD - 1818A（1993. 10. 4）《系统电磁效应要求》、MIL - B - 5087B（1964. 10. 15）《宇航系统的电气搭接和雷电保护接地》、MIL - STD - 1385B（1986. 8. 6）《预防电磁场对军械危害的一般要求》。

我国第一个系统 EMC 标准 GJB1389—92《系统电磁兼容性要求》是参照 MIL - E - 6051D 编制的。新一版的系统 EMC 标准 GJB1389A—2005《系统电磁兼容性要求》是参照 MIL - STD - 464A 编制的，已于 2006 年颁布实施并代替了 GJB1389—92。

2.1.3　系统 EMC 要求的内容

尽管各种系统 EMC 要求有各自的特定内容，但一些通用要求都是相同的，这里列出主要要求：

1. 系统内各设备要满足设备 EMC 要求。

如军用设备的 GJB151A 和 GJB152A，信息技术设备的 GB9254 和 GB/T17618。

2. 对雷电、电磁脉冲、静电的敏感度要求。

3. 天线间隔离度。

4. 重要设备的 EMC 安全裕度。

5. 电源系统的 EMC 特性。

6. 电磁环境。

7. 接地与搭接阻抗。

8. 电磁辐射危害。

2.1.4　实现系统 EMC 的技术途径

实现系统 EMC 通常采取以下途径。

1. 系统 EMC 预测分析

通过建立干扰源、敏感设备、耦合路径的数学模型，利用计算机数值求解，计算系统内与系统间 EMI，并与之配套 EMC 数据库，以提供可靠的原始数据。国外经验表明，EMC 预测分析是解决系统 EMC 问题最有效的方法，国外在 20 世纪已开发出多个系统级 EMC 预测软件，典型的如美国 IEMCAP、白俄罗斯 EMC－A 等。

2. 研究系统内和系统间 EMI 抑制措施

系统内和系统间 EMI 抑制措施包括屏蔽、滤波、接地、隔离/去耦，也包括在时域、频域、空间等的回避。

3. 系统 EMC 测试与诊断

借助系统 EMC 测试装置对表征系统 EMC 的特性参数进行准确测量及故障诊断，对系统 EMC 进行测量评估。

4. 系统 EMC 优化设计

系统 EMC 优化设计包括天线系统优化布置、设备合理布局、线缆布局与选型、系统接地设计、频谱管理与利用、电磁辐射防护，系统 EMC 大纲的编制与实施等。

2.2　系统间 EMC 预测分析技术

2.2.1　系统间 EMC 预测基本原理

系统间电磁干扰（EMI）指共置于一个公共电磁环境内的多个收、发信机之间的干扰，系统间干扰主要通过收、发天线进行耦合。

1. 预测方程

EMI 的形成离不开三要素（见图 2－1），即干扰源、耦合通道和敏感设备，系统间 EMI 的考虑出发点也基于此。系统间 EMI 发生在无意的收－发对之间，因此通常是通过收、发天线耦合干扰能量，该耦合函数是频率、时间、距离和收发天线相对方位的函数。

为了计算单个干扰源和单个敏感设备之间的电磁干扰，应将源函数和传输函数（它由传播函数与天线函数组成）结合起来，以得到在接收机或其他敏感设备处的有效功率，然后

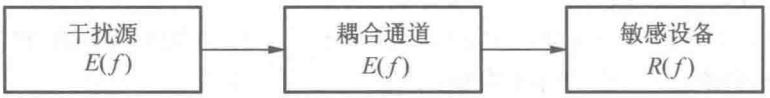

图 2-1 电磁干扰三要素

将有效功率与敏感度门限相比较来确定是否存在潜在的 EMI。

在敏感设备处的有效功率 P_A(dBm)可表示为

$$P_A(f,t,d,p) = P_T(f,t) + C_{TR}(f,t,d,p) \tag{2-1}$$

其中,P_T(dBm)为发射机功率,f,t,d,p 分别表示频率,时间,间距及收、发天线相对方向。C_{TR}(dB)可表示为

$$C_{TR}(f,t,d,p) = G_T(f,t,d,p) - L(f,t,d,p) + G_R(f,t,d,p) \tag{2-2}$$

上式中,G_T(dBi)为发射天线增益函数,L(dBi)为收、发天线间的电波传播函数,G_R(dBi)为接收天线增益函数。

敏感设备的敏感度门限值设为 P_R(dBm),如果 $P_A < P_R$,可保证电磁兼容性;相反,如果 $P_A > P_R$,则存在 EMI 问题;当 $P_A \approx P_R$ 时,处于临界状态,即可能存在 EMI,也可能不存在。为了表示方便,我们将两者之差定义为干扰余量 IM(dB),即

$$IM = P_A - P_R \tag{2-3}$$

对于接收机来说,P_R 为灵敏度,通常用内部噪声 N(dBm)表征,所以干扰余量 IM 表示调谐时在接收机输入端口的干扰-噪声比。将(2-1)与(2-2)代入(2-3)中,并考虑收发频率间隔 Δf,可得到下式

$$IM = P_T + G_T - L + G_R - P_R + CF(B_T,B_R,\Delta f) \tag{2-4}$$

CF(dB)为计入收、发信机带宽 B_T,B_R 及频率间隔 Δf 的修正系数。

(2-4)式为系统间电磁兼容性预测方程,适合于无线窄带收发设备间 EMI 的预测。

2. 筛选预测技术

筛选预测法对发射机、接收机、天线及电波传播建立通用的数学模型,该模型是基于理论的或大量数据统计的。对于发射机,存在基波发射与杂波发射;对于接收机,存在基波响应与杂波响应。因此,发射机发射与接收机响应之间存在多种组合方式,根据收、发对的组合方式,可将 IM 分类如下:

(1)基波干扰余量(FIM)——发射机基波发射与接收机基波响应;

(2)发射机干扰余量(TIM)——发射机基波发射与接收机杂波响应;

(3)接收机干扰余量(RIM)——发射机杂波发射与接收机基波响应;

(4)杂波干扰余量(SIM)——发射机杂波发射与接收机杂波响应。

系统间 EMI 预测分析采用逐对计算的方式,即每次选一个发射机和一个接收机,考虑上面多种收、发组合方式。当发射机和接收机不止一台时,这种发射-接收组合的数目往往很大,EMI 问题十分复杂。为了有条不紊地对系统间 EMI 进行预测分析,我们将采用分级筛选的方法,由粗而精,逐层分析。具体可分为以下四步(图 2-2):

(1)幅度筛选　采用预测方程的简单和保守的近似模型,主要从功率角度对诸多干扰发射机能否产生潜在干扰进行快速筛选。幅度筛选可将大量弱干扰与相当少的强干扰分离开来,对前者不再做后面各级的预测。

(2)频率筛选　以幅度筛选结果为基础,通过比较收、发设备的带宽大小以及两者的频

差的因素，对幅度筛选的结果（干扰余量）进行修正。从而进一步消除那些难以产生干扰的发射设备。

（3）详细预测　经过前两步的筛选，如果系统间还存在 EMI（即干扰余量大于筛选电平），需对产生干扰收、发对进行详细预测分析，该预测主要较为详细的考虑电波传输损耗修正、天线近场修正等因素。

（4）邻近频道预测　对于接收机，若在其邻近频道内存在多个干扰发射机时，还必须考虑接收机邻近频道干扰，即考虑接收机在多个的干扰信号下的减敏、互调和交调效应。

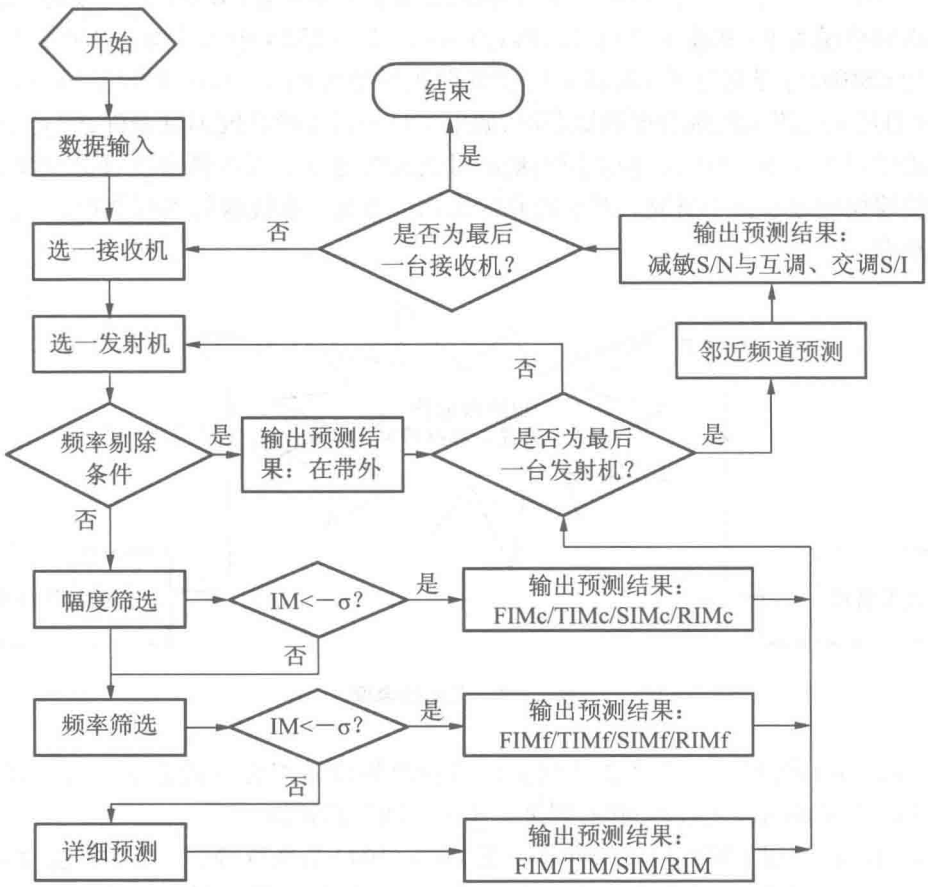

图 2－2　筛选预测分析流程

在图 2－2 中，－σ 为筛选电平；FIMc，TIMc，RIMc 及 SIMc 为四种干扰余量在幅度筛选后的干扰余量电平；FIMf，TIMf，RIMf 及 SIMf 为四种干扰余量在频率筛选后的干扰余量电平。

3. 混合预测技术

筛选预测法需要建立复杂的发射机、接收机、天线及传播模型，而且所建模型为统计模型，预测精度并不高，但对于局部区域无线电系统的方案设计阶段，该精度完全可满足规划人员对系统指标的分配与设计。

对现有的局部区域无线电系统，为了制定其测试大纲，同样也需要进行系统间的电磁兼容性预测分析。当对已有的无线电系统进行预测分析时，如果还采用逐级筛选数模预测

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com