

产品设计中的 **EMC** 技术 (第三版)

EMC for Product Designers (Third Edition)

Tim Williams 著

李迪 王培清 译



Newnes



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[Http://www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)

产品设计中的 EMC 技术（第三版）

EMC for Product Designers (Third Edition)

Tim Williams 著

李 迪 王培清 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

随着经济与电子技术的发展,电磁兼容(EMC)越来越受到电子、电气设备设计人员的关注。

本书内容覆盖了 EMC 指令下的应用、标准和测试方法,以及为了满足符合性要求而采用的设计原理和技巧,几乎包括了所有满足 EMC 指令的必要信息。更重要的是,它指导读者如何将 EMC 设计规则应用到产品中去。

本书可以作为电子产品设计部门在 EMC 方面的必备参考书,也可以作为电子和电气工程师进行 EMC 培训和学习的教材或参考资料。此外,本书也可供 EMC 测试工程师、工程管理人员以及电子类专业的高年级学生参考学习。

Copyright © 2001 by Tim Williams

This edition of EMC for Product Designers 3rd edition by Tim Williams is published by arrangement with Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, England

Translation Copyright © 2004 by Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体版专有版权由 Butterworth-Heinemann 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号:图字:01-2003-1044

图书在版编目(CIP)数据

产品设计中的 EMC 技术/(英)威廉姆斯(Williams, T.)著;李迪,王培清译. —3 版. —北京:电子工业出版社, 2004.6

书名原文: EMC for Product Designers

ISBN 7-5053-9809-1

I. 产… II. ①威… ②李… ③王… III. 电子产品—电磁兼容性—设计 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 027650 号

责任编辑:雷洪勤 高买花

印 刷:北京冶金大业印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:19 字数:483 千字

印 次:2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

译者序

随着经济与电子技术的发展, EMC (电磁兼容) 越来越受到电子、电气设备设计人员的关注。为了满足符合性测试的要求或保障设备的稳定性与可靠性, 需要设计人员对系统进行完备的 EMC 设计。但长期以来, 国内匮乏 EMC 设计方面的技术参考资料, 对于设计人员来说, 很难找到适合他们, 尤其是比较系统的 EMC 参考资料。相比之下, 国外在这方面就做得比较好, 有大量优秀的与 EMC 技术相关的著作出版发行。作为专业的 EMC 工程师, 我们对此深有感触, 因而觉得有责任把国外一些优秀的 EMC 书籍和资料介绍给国内众多的 EMC 技术人员及产品设计人员。

在大量国外的优秀 EMC 技术书籍中, 我们精心挑选了几本书。第一本书《电子系统中的噪声抑制与衰减技术》(作者亨利·奥特) 已翻译完成并由电子工业出版社出版发行, 而《EMC for Product Designers》是我们向读者郑重介绍和推荐的第二本书。本书是 EMC 设计领域中既系统全面、又紧跟最新技术发展的一本实用的参考书, 是公认的 EMC 方面的标准教科书, 其大部分内容直接来自作者为进行 EMC 设计和测试讲座而准备的课程讲义。本书内容共包括两大部分, 第一部分有 4 章内容, 专门讲述 EMC 指令及其标准和测试; 第二部分有 5 章内容, 专门讲述 EMC 设计技术及其原理; 在本书最后, 作者还精心准备了附录, 包括 EMC 设计查检表和相关的公式及表格等, 供广大读者参考。

本书的英文版现已发行了第三版, 并已被译成多国文字出版, 其内容覆盖了 EMC 指令下的应用、标准和测试方法以及为了满足符合性要求而采用的设计原理和技巧, 几乎包括了所有满足 EMC 指令的必要信息; 更重要的是, 它可以教授读者如何将 EMC 设计规则应用到产品中去。实用性是本书的最大特色, 因而本书可以作为电子产品设计部门在 EMC 方面的必备参考书, 也可以作为电子和电气工程师进行 EMC 培训和学习的教材或参考资料。此外, 也可供 EMC 测试工程师、工程管理人员以及电子类专业的高年级学生参考学习。

本书的作者蒂姆·威廉姆斯是英国著名的 EMC 专家, 现为 IEEE 会员。曾经在众多大型公司从事电子工程设计工作达 20 年之久, 现专门从事 EMC 技术的咨询与培训, 曾经为国内一些大型设备生产商提供过 EMC 专业技术咨询服务。作者已在相关权威刊物上发表专业论文数十篇, 另有数本 EMC 著作出版。

在翻译本书的过程中, 我们得到了来自多方面的帮助和支持, 包括作者本人的大力支持, 很多 EMC 专家和工程师也对译稿提出了大量的修改意见, 对此我们深表感谢。希望本书的出版和发行可以帮助读者学习和了解最为实用的 EMC 应用设计技术及技巧, 为 EMC 设计技术的推广和应用做出微薄的贡献。

限于译者的水平, 译文中难免有不当或错误之处, 敬请广大读者批评指正。

译者
2004 年 4 月

前言

1991 年圣诞节,在英国最受欢迎的电视节目是“Auntie's Bloomers”。有上百万的观众观看了电视台播放的有关知名人物在摄像机拍摄时尴尬时刻的精选剪辑,这些资料都来自 BBC 公司资料库,这样的片段一直很受欢迎。对相当多观众来说,他们的欢乐将会受到另一类型 Bloomer* 的干扰。在 1985 年上半年还没有进行广播电视服务改革之前,英国的无线电调查事务局平均每月要收到 1900 个对广播电视接收的投诉。RIS 大约 80% 的资源都花费在家用广播电视接收问题上。斑点、杂乱信号、雪花点、色彩与影像失真以及图像偶尔彻底消失都是由同一个原因——电磁干扰引起的。

当观看重要节目时,如果图像出现闪烁甚至消失,观众都会非常恼火。就像一个音乐爱好者正准备从 FM 广播中翻录一段非常重要的节目时,结果因为邻居家电钻的声音而无法找到安静的波段一样。在市中心,如果紧急服务因为受到数千台计算机终端发射的无线电“烟雾”的影响而信号模糊甚至无法通信,那就非常危险了。

所有使用电磁波传递信息的无线电业务与产生电磁能量的技术过程及产品密切相关。尽管这些电磁能量是无用的副产品,但现在无线电业务的共存引起了电磁兼容问题。对此折中的解决方案是:无线电业务必须允许一定程度干扰的存在,但该干扰发射不能超过某一标准,这就涉及到对干扰的能量进行限制或抑制的方法。这种在经济上的妥协是与生俱来的,干扰的水平越低,表明需要的发射机的功率越低,抑制的成本也将更高。若能接受大功率的发射机(频谱使用效率必然低),反过来它的抑制成本也低。在过去 10 年里,人们已经为允许的干扰水平制定了各种不同的标准。

EMC 问题不只局限于对无线电业务的干扰。各类主要的电子设备对外界干扰引起的故障已越发敏感,这种现象也越来越引起人们的关注。这主要是基于以下两个原因:首先,在日常生活中,电子设备的相互影响及其广泛深入的应用;其次,对于使用塑料外壳和微处理器的现代设备,它们的抗干扰能力相对更差。对于众多类型的电子装置来说,其对干扰的敏感度现在已经成为了一个问题,特别是那些由于安全或经济原因而必须连续运行的重要设备。汽车和空间控制系统是前者的一个实例,银行与通信网络则是后者的实例。

如今有了一个极为紧迫的需求——采取强制性措施来确保设备的电磁兼容性。过去,不同国家的管理机构已经采取了特别手段对某些类型产品的部分电磁特性强加限制,而这些手段常常被视为实施背后保护主义。由于部分标准在技术上有欠缺,所以容许对进口产品及国产产品采用不同的标准。

现在有许多了解 EMC 的方法。大多数 EMC 培训课程及初级研讨会就是非常好的起点。尽管可以聘请顾问解决 EMC 符合性过程中的每一个问题,但对于大多数产品来说,这种做法代价太高,也非常麻烦,而且不一定能够改善 EMC 技术。

有一个好的折中方案——任命一个人或一个小组作为公司的 EMC 专家技术中心,职责是实施 EMC 指令的标准以及其他公司的 EMC 要求。不断地使 EMC 的原理知识渗透到公司的每一个工作分支中去,使它们自然成为分支中的一部分。尽管这样做需要连续几年的教育与培养,但不再需要 EMC 中心。主要的任务包括:

* 译者注: Bloomer 原有灯笼裤之意,此处为幽默的表达方式,实指电磁干扰。

• 贯彻 EMC 原则, 在整个开发和原型机阶段检查每一个新产品的的设计, 必要时建议设计更改;

- 为每一个产品草拟并实施 EMC 测试与控制计划;
- 指导产品的预符合性和符合性测试, 包括在公司内部以及联络外部的测试实验室;
- 继续了解、熟悉适用于公司产品的 EMC 标准与法规;
- 与市场、销售、生产、测试、安装和服务部门保持联系, 保证他们的策略与产品的 EMC 要求保持一致。

再往下很可能涉及更为具体的工作任务——对 EMC 工程师的工作范围进行说明。这些工作有可能比得上质量部门的任务, 而且有时确实与质量部门的工作结合在一起。

本书第二版于 1996 年出版, 那时 EMC 指令的功能已经非常全面, 大多数公司已经对它很熟悉。尽管麦克斯韦方程并没有改变, 但人们已经对如何应用它来最大化产品的兼容性有了更深入的理解。

本书旨在帮助 EMC 中心的工作, 可以作为 EMC 工程师的参考书, 也可作为不了解 EMC 的设计师和技术人员的背景阅读材料。本书共包括如下两部分内容。

第一部分(第 1~4 章)讨论了围绕 EMC 建立起来的欧洲立法的结构以及用于验证的测试技术。前两章主要是非技术性的内容, 第 1 章介绍了干扰, 接着讨论了 EMC 指令的规定与获得符合性的方法; 第 2 章介绍了由标准制定的结构, 并描述了现有与指令符合性相关的各种协调标准; 第 3 章涵盖了 RF 发射和电源输入电流谐波的测试方法, 这些都是标准中的内容, 也是公司内部测试和外部测试实验室都必须遵从的; 第 4 章则详细介绍了抗扰度的测试, 包括 RF 抗扰度、ESD 和瞬态抗扰度, 以及磁场和电压跌落与中断的低频类技术。

第二部分(第 5~9 章)讨论了在设计阶段以最小成本获得可接受的 EMC 性能的各项技术。尽管在现成的设计上增加屏蔽或抑制元件使之满足 EMC 标准的做法是可行的, 但这种强制方法的代价高、时间长、效率低。最好的解决方案是: 在设计一开始就遵循合适的设计原则, 这样可以使产品一次性达到符合性要求; 如果不能, 修改方案实施起来也会容易得多。第 5 章主要介绍从源到被干扰者的电磁干扰耦合有关的基本原理; 第 6 章介绍在求助于诸如屏蔽和抑制这种传统设计方法之前可以应用的技术: 关注设备和 PCB 布局、接地; 第 7 章则讨论了电路结构的选择、元器件及软件的特性; 第 8 章继续介绍公认的“特殊的”EMC 技术, 包括电缆的结构与端接、滤波方法和元器件以及屏蔽; 第 9 章讨论了 EMC 管理与控制原则。最后, 附录提供了更详细的参考信息。

本书的大部分内容来自于为“EMC 的设计与测试”培训准备的课堂笔记。我非常荣幸地看到产品设计人员来参加这些培训, 是他们鼓励我继续改进本书的内容。许多人都曾对它做过改进。我要特别感谢约克大学的 Andy Marvin 教授和 John Dawson 博士以及他们的同事; 还要感谢 Jasper Goedbloed 博士和 Piet van der Laan 教授; 我与 Schaffner-Chase EMC 有着长期而富有成效的合作关系。同时还要特别感谢 David Riley, John Dearing, Ray Hughes 和 Nick Smith。在这里, 我还要提到《Approval》杂志社的编辑 Adrian McLeod, 特别是我的顾问、同事 Dave Imeson, Keith Armstrong 和 Phil Carter。

蒂姆·威廉姆斯 (Tim Williams)

2000 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 EMC 简介.....	(1)
1.1.1 系统间的兼容性	(2)
1.1.2 EMC 的范围	(3)
1.1.3 兼容性裕量	(8)
1.2 EMC 指令.....	(9)
1.2.1 新方法指令	(9)
1.2.2 立法背景	(11)
1.2.3 范围、要求和例外	(11)
1.2.4 CE 标志与符合性声明	(14)
1.2.5 生产质量评估	(15)
1.2.6 系统与安装	(16)
1.2.7 实施、执行与制裁	(17)
1.3 对指令的符合性	(20)
1.3.1 自我认证	(20)
1.3.2 技术构造文件	(20)
1.3.3 无线电发射机和电信终端设备	(22)
1.3.4 测试和审查机构	(22)
1.3.5 标准	(24)
1.4 符合性行为	(26)
1.5 SLIM.....	(27)
1.5.1 国内市场的简化立法	(27)
1.5.2 第二版	(27)
第 2 章 标准	(29)
2.1 标准制定组织	(29)
2.1.1 国际电工委员会	(29)
2.1.2 CENELEC 和 ETSI	(33)
2.2 通用标准——发射	(35)
2.2.1 EN 50081 part 1:1992	(36)
2.2.2 EN 50081 part 2:1993	(36)
2.2.3 EN 55011:1998 + A1:1999	(37)
2.2.4 EN 55014-1:1993 + A1:1997 + A2:1999.....	(37)
2.2.5 EN 55022:1998.....	(38)
2.3 通用标准——抗扰度	(38)
2.3.1 EN 50082 part 1:1997	(38)

2.3.2	EN 50082 part 2:1995 (EN 61000-6-2: 1999)	(39)
2.4	基础标准——IEC 61000	(41)
2.4.1	IEC 61000-3	(41)
2.4.2	IEC 61000-4	(42)
2.5	产品标准	(46)
2.5.1	电视广播接收机及其相关设备	(47)
2.5.2	家用电器、电动工具及类似用途设备	(48)
2.5.3	照明设备	(49)
2.5.4	信息技术设备	(50)
2.5.5	专业视听和娱乐照明设备	(50)
2.5.6	测量、控制和实验室设备	(51)
2.5.7	火、入侵者及社会报警系统	(52)
2.5.8	电信网络设备	(52)
2.5.9	无线电设备	(53)
2.5.10	调速电力驱动系统	(53)
2.5.11	医疗电设备	(54)
2.5.12	汽车标准	(55)
2.5.13	其他产品标准	(55)
2.6	与 EMC 指令无关的其他标准	(56)
2.6.1	FCC 标准	(56)
2.6.2	其他非协调标准	(58)
2.6.3	测量标准	(58)
2.7	射频发射限值	(59)
第 3 章	发射的测量	(61)
3.1	射频发射	(61)
3.1.1	测量仪器	(61)
3.1.2	传感器	(67)
3.1.3	测量设施	(74)
3.1.4	测试方法	(79)
3.1.5	不确定度的来源	(82)
3.2	电源谐波电流与闪烁发射	(88)
3.2.1	测量设备	(88)
3.2.2	测试条件	(89)
3.2.3	设备分类与限值	(90)
3.2.4	闪烁	(91)
第 4 章	抗扰度的测试	(95)
4.1	射频抗扰度	(95)
4.1.1	设备	(95)
4.1.2	测试设施	(101)
4.1.3	测试方法	(104)

4.1.4	传导射频抗扰度	(106)
4.2	ESD 和瞬态抗扰度	(108)
4.2.1	ESD	(108)
4.2.2	EFT 瞬态群	(110)
4.2.3	浪涌	(112)
4.2.4	易变性的来源	(113)
4.3	磁场与电源质量抗扰度	(114)
4.3.1	磁场	(114)
4.3.2	电压跌落和中断	(115)
4.4	测试结果评估	(117)
4.4.1	性能指标	(117)
第 5 章	干扰耦合机理	(119)
5.1	源与受害者	(119)
5.1.1	公共阻抗耦合	(120)
5.1.2	分布式近场耦合	(122)
5.1.3	电源线耦合	(124)
5.1.4	辐射耦合	(124)
5.1.5	耦合模式	(126)
5.2	发射	(129)
5.2.1	辐射发射	(129)
5.2.2	传导发射	(131)
5.3	抗扰度	(133)
5.3.1	辐射场	(133)
5.3.2	瞬态	(137)
5.3.3	静电放电	(140)
5.3.4	低频磁场	(142)
5.3.5	电源电压现象	(143)
5.4	电源谐波电流	(144)
5.4.1	电力供应者问题	(144)
5.4.2	非线性负载	(144)
第 6 章	布局与接地	(148)
6.1	设备的布局与接地	(149)
6.1.1	系统划分	(149)
6.1.2	接地	(150)
6.1.3	接地系统	(153)
6.2	PCB 的布局设计	(156)
6.2.1	无地平面时的地布局	(156)
6.2.2	地平面的应用	(158)
6.2.3	I/O 与电路地的规划	(165)
6.2.4	PCB 布局规则	(168)

第 7 章 数字与模拟电路设计	(169)
7.1 发射控制的设计	(169)
7.1.1 傅里叶频谱	(169)
7.1.2 逻辑电路产生的辐射	(172)
7.1.3 数字电路的去耦	(178)
7.1.4 模拟电路与发射	(182)
7.1.5 开关电源	(183)
7.2 抗扰度设计	(188)
7.2.1 数字电路: 干扰路径	(188)
7.2.2 逻辑电路的噪声抗扰度	(193)
7.2.3 微处理器的看门狗电路	(195)
7.2.4 防御性编程	(199)
7.2.5 瞬态与 RF 抗扰度——模拟电路	(202)
第 8 章 接口、滤波与屏蔽	(207)
8.1 电缆与连接器	(207)
8.1.1 电缆的分类隔离与回路	(207)
8.1.2 低频时的电缆屏蔽层	(208)
8.1.3 RF 时的电缆屏蔽层	(210)
8.1.4 电缆屏蔽层的类型	(211)
8.1.5 屏蔽电缆的连接	(213)
8.1.6 非屏蔽电缆	(215)
8.1.7 结构化电缆: UTP 与 STP	(217)
8.2 滤波与抑制	(218)
8.2.1 滤波器的结构	(218)
8.2.2 元件	(221)
8.2.3 电源滤波器	(225)
8.2.4 输入/输出滤波	(230)
8.2.5 瞬态抑制	(231)
8.2.6 接触器的保护	(234)
8.3 屏蔽	(235)
8.3.1 无穷大屏蔽板的屏蔽理论	(236)
8.3.2 低频磁场	(238)
8.3.3 开孔效应	(238)
8.3.4 镜像平面	(243)
8.3.5 屏蔽硬件	(245)
8.3.6 机箱屏蔽效能的标准化	(248)
第 9 章 电磁兼容管理	(250)
9.1 管理 EMC 过程	(250)
9.1.1 表达 EMC 范围	(250)
9.1.2 EMC 协调人员	(251)

9.2	控制计划	(252)
9.2.1	目的	(252)
9.2.2	内容	(253)
9.3	测试计划	(253)
9.3.1	测试计划的必要性	(253)
9.3.2	内容	(254)
9.3.3	测试与校准程序	(256)
9.3.4	抗扰度性能指标	(257)
9.3.5	生产 QA 测试	(257)
附录 A	EMC 设计检查表	(259)
附录 B	EMC 的计算机辅助设计	(261)
B.1	概论	(261)
B.2	建模工具包	(262)
B.3	电路的计算机辅助设计	(263)
附录 C	有用的表格与公式	(264)
C.1	分贝	(264)
C.2	天线	(265)
C.3	场	(266)
C.4	屏蔽	(269)
C.5	电容、电感与 PCB 布局	(270)
C.6	滤波器	(272)
C.7	傅里叶级数	(273)
附录 D	欧盟和欧洲经济区国家	(275)
D.1	欧盟国家	(275)
D.2	欧洲经济区	(275)
附录 E	名词术语	(276)
参考文献		(279)

第 1 章 绪 论

1.1 EMC 简介

电磁干扰 (EMI) 是一种严重的并不断增长的环境污染形式, 其影响小至广播接收时产生让人厌烦的噼啪声, 大至安全至关重要的控制系统的崩溃而可能导致致命的事故。EMI 的不同形式可能导致电气和电子故障, 或妨碍无线电频谱的正常使用, 或引燃易燃气体或其他危险气体, 甚至可能对人体组织产生直接影响。随着电子系统更深入地渗透到社会的各个方面, 干扰造成的影响和因 EMI 导致的严重事件的可能性都将增加。

下面是一些媒体报道的电磁不兼容的案例, 具体包括以下方面:

- 在德国, 某种类型的轿车在一段与一个大功率广播电视发射机相对的高速公路上行驶时发动机会停转。结果, 不得不用金属网将那一段高速公路屏蔽起来。
- 在另一种类型的轿车上, 当使用车载移动电话时, 车上的中间门锁和遮阳篷顶会不断地开合。
- 在伦敦北部靠近布雷克曼公园中的中波发射台安装的新式电子按键电话机不断受到 BBC 收音机节目的干扰。
- 在美国, 警察局抱怨投币电子游戏机严重干扰他们的公路通信系统。
- 在一家美国机场, 干扰其航空安全通信的原因可追溯到 1.6km 以外的一个电子收银机。据说某客机仪表盘上有这样的标志: “有高频发射时, 请忽略所有的仪表指示”。
- 在鞋店、服装店和眼镜商店等地方使用的电子售货机 (这些地方经常使用厚地毯和涂有尼龙辅助物品) 可能会出现锁定、数据错误或无法控制抽屉自动开启等现象。
- 当在一个停车场栅栏控制盒边上使用压电式点烟器时, 其发射的脉冲会使栅栏打开, 以至于司机可以免费停车。
- 可能最具悲剧性的例子是在福克兰群岛战争中 (即有名的英阿马岛战争) HMS 谢菲尔德号舰船的命运: 因为干扰了舰船的卫星通信系统, 本来可以侦测到来袭导弹的导弹预警雷达被关闭了, 结果被敌方导弹击沉。

移动蜂窝电话的迅速普及使其成为威胁电磁兼容的一个严重问题。搭乘民用飞机的乘客现在都知道登机时不允许使用这些设备, 虽然他们可能并不知道为什么要这样做。自从 1983 年以来, IFALPA 国际季度评论曾报道了 97 例因为乘客携带和使用电子设备而导致的与电磁干扰有关的事件。下面引用该评论中的部分内容:

自 1990 年以来, 飞机配备的电子装置的数量明显增加, 并且现代飞行器中数字电路的低压工作更潜在地加大了其对电磁干扰的敏感性。

近十年来的统计数字表明: 在巡航飞行期间经常遇到电磁干扰。然而, 这可能引起误导。在近三年中, 报道的 43% 的事件发生在巡航飞行期间, 然而几乎相同比例的事件发生在起飞和降落期间。

特别提示: 近三年中, 与计算机、CD 播放机及电话相关的事故在惊人地增加, 并且已

发现这些装置会导致更多对飞机飞行控制系统的干扰。

在很多情况下,要想识别仪表或自动驾驶仪的故障与电磁干扰是否相关非常困难,甚至是不可能的。在一些报道的事件中,飞行器已离开跑道,但驾驶员座舱中的仪表仍显示在跑道上。航空管制者不得不提醒机组人员注意跑道偏离情况。我们相信,还有很多电磁干扰事件正在发生,人们可能未认识到它们与电磁干扰有关,而未被报道出来。

该评论中还提及了下面几个特殊点:

- 事故呈上升趋势;
- 飞行全过程是无掩蔽的(不仅仅是巡航);
- 很多装置可能导致 EMI (电话、计算机、CD 播放机、摄像机、立体声音响);
- 飞机上通常不止一个相关装置;
- 即使已被告知需关闭某装置,乘客也还会打开它;
- 乘客会偷偷使用一些装置(如电话、计算机);
- 乘客在飞机刚起飞后和尚未着陆前打开一些装置;
- 电话是很严重的问题;
- 机组人员应记录并报道特殊装置的类型和所在位置;
- 当电磁干扰发射装置被关闭后,飞行系统恢复正常运转(在偏离跑道的案例中,可能需要重新调整跑道);
- 飞行服务人员应该能迅速地识别可能存在的电磁干扰装置。

在 2000 年, Civil Aviation Authority 对停在 Gatwick 的两架飞机进行了测试,以加强发动机运行时禁止使用移动电话的禁令。该测试表明:受干扰程度随电话位置的略微改变而变化,由于机上乘客可以吸收部分信号,所以乘客数量也会影响到干扰的程度。

另外一个可能危及生命的例子是电子医疗器械的电磁兼容性。1995 年的一篇评论文章详细描述了三起事件且列举了一百多个电磁干扰问题,在 1979 年~1993 年间,美国《食品与药物管理》曾对这些问题进行过报道。该评论坦率地说:

在电子医疗器械中与电磁干扰相关的性能降级已经导致一些死亡和严重伤害事件,不采取恰当的管理措施可能会危及人的生命安全。

1.1.1 系统间的兼容性

电磁干扰受到所采取的电磁兼容(EMC)策略的控制。EMC 的定义是:“一个装置、设备或系统可以在其电磁环境中正常工作,并且不对其所在环境中的任何其他事物产生难以容忍的电磁干扰”。EMC 这一术语包含以下两个方面的含义:

- 它描述了电气或电子系统运行时不干扰其他系统的能力;
- 同时,它描述了这些系统在特定的电磁环境中可按预期运行的能力。

因而,它与系统运行时所处的环境是密切相关的。有效的 EMC 要求系统在设计、生产和测试时要考虑其预期的运行电磁环境,即所在电磁现象的总和。尽管术语“电磁”更侧重强调与高频场有关的现象,但在实际应用中,EMC 的定义包含了所有的频率和耦合路径,频率范围从直流到工频直到射频以及微波。

1. 一个装置中的子系统

EMC 的方法有两种。其一,装置的本身特性决定了所采用的方法。当几种电气或电子系

统被装入同一个高度集成的装置中时, EMC 问题尤为突出。例如, 在飞机、船舶、卫星或其他交通工具上。在这样的情况下, 敏感系统可能被放置在距大功率发射器很近的地方, 需要特殊的防护措施以保证其兼容性。要做到这些, 需要搞清楚设备情况, 还需了解发射机的特性及其潜在的敏感装置的详细情况。为迎合此需要, 军事、太空和交通工具的 EMC 规范已有非常好的进展, 并且特定工业部分的 EMC 规范也已很好地建立起来。

由于本书主要关心的是如何进行产品设计以满足 EMC 指令的要求, 所以我们不用考虑“内部系统”, 因为对这一主题的讨论已有很长的历史了, 而且还有一些教材专门对此进行了论述。

2. 设备隔离

第二种方法则假定系统在某一限值范围内的良性电磁环境中运行, 而且它对其他敏感设备的接近程度也被控制在限定范围以内。例如, 在大多数情况下, 在靠近大功率雷达发射机的区域内不得使用个人计算机, 计算机也不会放置在紧靠移动无线电接收天线的地方。这样, 就允许设置一组很宽范围的限值, 既适合于规定来自某一装置的允许发射量, 又适合于规定装置可以连续正常运行的环境中的干扰水平。这些限值与产品的市场环境分类直接相关, 包括家庭、商业和工业等。这些限值和测量方法形成了 EMC 系列化标准(其中一些针对发射, 一些针对抗扰度)的基础。

需要注意的是, 符合这些标准并不能保证在所有条件下系统都具有电磁兼容性。更准确地讲, 即确定这样一种可能性: 在典型条件下运行时, 设备既不会导致干扰, 对干扰也不敏感。有时不可避免地存在着一些特殊的环境, 在这些环境中, 无法获得合适的电磁兼容, 必须采取额外的防护措施。例如, 在大功率发射机的附近使用计算机。

1.1.2 EMC 的范围

EMC 提出的主要问题将在下面进行讨论。微处理器的广泛使用使得对 EMC 的关注达到了高潮。这些装置对射频干扰的产生负有很大责任, 并且它们自己对一些干扰现象也非常敏感。同时, 用注塑外壳广泛代替金属机架和机箱也大大降低了对电路的保护程度。

1. 系统故障

固态元件尤其是基于处理器的控制系统已经替代了早期由机电或模拟设备(例如, 继电器逻辑或比例控制器)完成的许多功能。与用硬连线电路完成一项特殊任务相比, 可编程电子系统要好得多, 它依赖于一个数字总线连接的架构。在该架构中, 多个信号经过软件控制复用到同一个硬件总线。这种结构不仅对干扰更敏感, 而且由于状态改变而只需要很少的能量, 所以干扰的后果是无法预测的。一个随机脉冲能否破坏运行取决于脉冲相对于内部时钟的时序、正被传输的数据和程序的执行状态等。只要保持低于逻辑阈值, 连续的干扰就不会产生影响。但当干扰进一步增大时, 处理器的运行将完全被破坏。随着功能复杂程度的增加, 在复杂的、不可预料的失效模式下, 系统出现故障的可能性也增加。

毫无疑问, 对控制系统的干扰造成的结果取决于被控制过程的价值。在一些案例中, 控制被破坏可能只是一个小麻烦; 而在另外一些案例中, 则有可能是经济损失, 甚至危及生命。失效可能造成的后果决定了需要在保证兼容性方面做出努力的程度。

现象

干扰控制系统的电磁现象包括:

- 供电电压的中断、跌落、浪涌和波动;
- 电源、信号和控制线上的瞬态过电压;
- 脉冲的(如雷达)或连续的射频场,它们可以直接耦合进设备或其连接的电缆上;
- 被充电的物体或人体产生的静电放电;
- 低频磁场或电场。

注意,我们并没有直接考虑由于静电放电而造成元件损坏的现象,虽然这是电子产品中普遍存在的一个主要问题。一旦元件被装配成一个单元,它们就受到保护而免于受到这种损坏,除非设计特别松散而没有考虑这一问题。但是,静电放电瞬态现象可以在不损坏任何元件的情况下(虽然有时也可能导致损坏)破坏微处理器或时钟电路的运行,就像耦合进电源和信号端口的瞬态干扰一样,这时的静电放电才是一种电磁兼容现象。

软件

由于软件本身的缺陷引起的功能问题有时会与电磁干扰产生的问题相混淆。特别是在实时系统中,外部瞬态现象与严格的软件执行状态之间的一些巧合能够引起运行故障,并且这种现象很难或不可能复现。这些缺陷很可能从开发测试直到现场运行多年都不会被发现。一些现象——系统崩溃、错误运行或数据缺陷可能是由电磁干扰所引起的。事实上,用户可能只能根据系统安装环境的特征来判断是软件缺陷的问题还是电磁兼容性差的问题。

2. 对射频接收的干扰

真正的无线电频谱用户不希望他们的使用过程受到无关设备运行的影响。一般地,在接收机的输入端,期望接收的信号强度在小于 $1\mu\text{V}$ 到大于 1mV 的范围之间变化。如果有一个干扰信号与期望接收的信号处于同一通道,并且其幅度相当或大于期望接收的信号,那么期望接收的信号就会被湮没。可以接受的共通道干扰的水平(保护因数)由期望的节目内容和干扰信号的特性决定。施加于高保真广播信号上的水平很低的连续干扰也是不可接受的。反之,承载压缩语音信号的信道可以承受相当高水平的脉动或瞬态干扰。数字通信甚至有更高的抗扰能力,但这只意味着当干扰达到一个更高的水平时,链路才可能会突然中断,而不是缓慢中断。

场强水平

不管是有意还是无意的,辐射干扰都随着到源的距离的增加而减小。对于自由空间的辐射场,远场(关于远场与近场的讨论参见第 5.1.4 节)测量时其缩减量与距离成反比。当接地变得不规则或无序时,场强会因衍射波的遮蔽、吸收、散射、分离和散焦等因素而进一步缩减。附录 D 中的标准 EN 55011^[136]建议:在频率范围 30~300MHz 中,距离大于 30m 处的场强随 $1/d^n$ 变化,这里的 n 在 1.3(开阔乡村)到 2.8(建筑林立的城区)之间变化。一般取平均值 $n=2.2$ 作为近似估计。因此,如果增加 10 倍的间距,干扰信号的强度就减小 44 dB。

无意发射的限值基于接收机可接受的干扰场强。也就是当接收机与发射源相距一个规定的距离时,对于某一特定的业务,期望的信号的最小强度由其保护比决定。这样,既不能保证对非常微弱的信号的接收,也不能保证不靠近干扰源,但这可以覆盖大部分的干扰例子,

并且这一方法已被所有的标准用来确定发射限值。如 CISPR 发布的商业设备的发射限值（参见第 2 章）。CISPR 出版物 23^[153]中给出了计算该限值的方法，包括干扰产生概率的统计基础。

当频率在 30MHz 以下，将干扰耦合出干扰设备的主要耦合方式是通过其连接的电缆。因此，辐射场限值被转换成等效的电压或电流水平。当施加在电缆上时，可产生相当于对高频和中频接收相似干扰的强度。

功能异常与频谱保护

从前面的讨论中，可以清楚地看到，射频发射限值并非由保护设备不产生功能异常的需要所决定，设备本身也不是一个接收机。在上面最后一部分的讨论中知，产生功能异常需要一个相当高的能量水平。例如，射频场强在 1~10 V/m 的情况下，频谱保护所需要的强度很低，仅有 10~100μV/m。两种设备间无论哪一种有意使用无线电频谱而产生不兼容的情况都是非常罕见的。通常，因本地射频传输，设备需要一定的抗扰度，同时必须限制无意发射，以保护有意的射频接收。因此，发射和抗扰度作为 EMC 的两个主要方面，分别着眼于两种不同的问题。

自由辐射频率

众所周知，某些类型的设备，如工业、科学、医疗（ISM）设备，可以产生用于非通信目的的很高的射频能量，例如，医用透热疗法和射频加热设备。必须为这些设备制定发射限值。实际上，国际电信联盟（ITU）已专门为此指定了一组频率值。设备只有在使用这些特定的频率（通常被称为“自由辐射”频率）时可不必符合发射限制的要求，表 1.1 列举了这些频率。表 1.2 是 CENELEC 各成员国指定的频率范围。

表 1.1 ITU 指定的工业、科学和医疗设备的自由辐射频率

（来源：EN55011: 1991）

中心频率/MHz	频率范围/MHz	
6.780	6.765~6.795	*
13.560	13.553~13.567	
27.120	26.957~27.283	
40.680	40.66~40.70	
433.920	433.05~434.79	*
2450	2400~2500	
5800	5725~5875	
24125	24000~24250	
61250	61000~615000	*
122500	122000~123000	*
245000	244000~246000	*

注：* 代表尚需要考虑的最大辐射发射限制，获得特殊授权后方可使用。

表 1.2 CENELEC 各成员国指定的频率范围

频率/MHz	最大辐射限值	说明
0.009~0.010	没有限制	德国
3.370~3.410	没有限值	荷兰
13.533~13.553	110dBμV/m (100m 处)	英国

续表

频率/MHz	最大辐射限值	说明
13.567~13.587	110dB μ V/m (100m 处)	英国
83.996~84.004	130dB μ V/m (30m 处)	英国
167.992~168.008	130dB μ V/m (30m 处)	英国
886.000~906.000	120dB μ V/m (30m 处)	英国

同道干扰

在无线电通信中, 另一个更深层次的问题(经常被认为是一个 EMC 问题, 但在本书中并不准备进行讨论)是来自非期望发射的同道干扰。当两个射频系统之间距离足够远而被授权使用同一个频率时, 异常的电磁波传播条件增加了有干扰点处的信号强度, 从而引发干扰问题。这是频段利用时的一个根本问题。

一个发射的信号可能使附近一个调谐到不同频率的接收机的输入级过载, 从而引起期望信号的灵敏度降低或失真。发射机自己的输出中除了授权频率之外, 还包含很多杂散频率分量。所以, 发射机类型批准机构不得不设置限值来限制这些频率分量。

3. 供电电源中的干扰

供电系统在电力分配时会受到各种干扰的影响。这些干扰可能来自供电网络、其他用户或同一网络上的其他负载。纯净的不间断电源不会很便宜, 供电费用及其质量之间的平衡由国家相关的法规要求所决定, 由供电机构根据经验进行调节。这类典型的干扰包括以下几个方面:

- 电压变化: 电源分配网络都有一个有限的源阻抗, 所以变化的负载能够对终端电压产生影响。它不包括用户场所产生的电压降, 允许有额定电压的 $\pm 10\%$ 的变化, 在英国这可以覆盖所有正常的电压变化情况。额定电压从 240V 变到 230V (根据 CENELEC 的协调文件 HD472S1:1988 的要求, 并根据 BS7697:1993^[16]在英国实施), 即从 1995 年 1 月 1 日起, 英国的额定电压为 230V, 误差范围分别是 $+10\%$ 和 -6% 。在 2003 年 1 月 1 日后起, 额定电压为 230V, 误差范围为 $\pm 10\%$, 与所有其他成员国一致。
- 电压波动: 在照明供电中, 幅度很小的短期(亚秒)电压波动就可以让人察觉到并感到很不舒服, 而很多电子设备都不会对此做出响应。大功率负载在开关时产生的闪烁要受到法规的控制。
- 电压中断: 几乎 100%的电压跌落问题都是由电源分配系统中的缺陷引起的, 但这些电压跌落可以被保护设备迅速地自动清除, 使供电系统中其余部分的电压可以立即得到恢复, 因此大部分用户只能看到一个短时的电压跌落。这种跌落发生的频率取决于用户的位置和季节因素。
- 波形失真: 在源端, 交流电源是纯粹的正弦波。但是电源分配系统的电抗性阻抗以及由非线性负载引起的谐波电流会导致波形失真。电力变换器和电子电源是主要的非线性负载。在远离非线性负载的地方, 这种谐波失真可能会因为网络中设备和部件的谐振等原因而更为严重。所以不仅非线性谐波电流必须加以限制, 而且设备本身也应能够在供电波形达到 10%的谐波失真的情况下正常运行。
- 电压瞬态和浪涌: 在感性电路中, 感性负载开关操作时产生的电流中断变化会产生