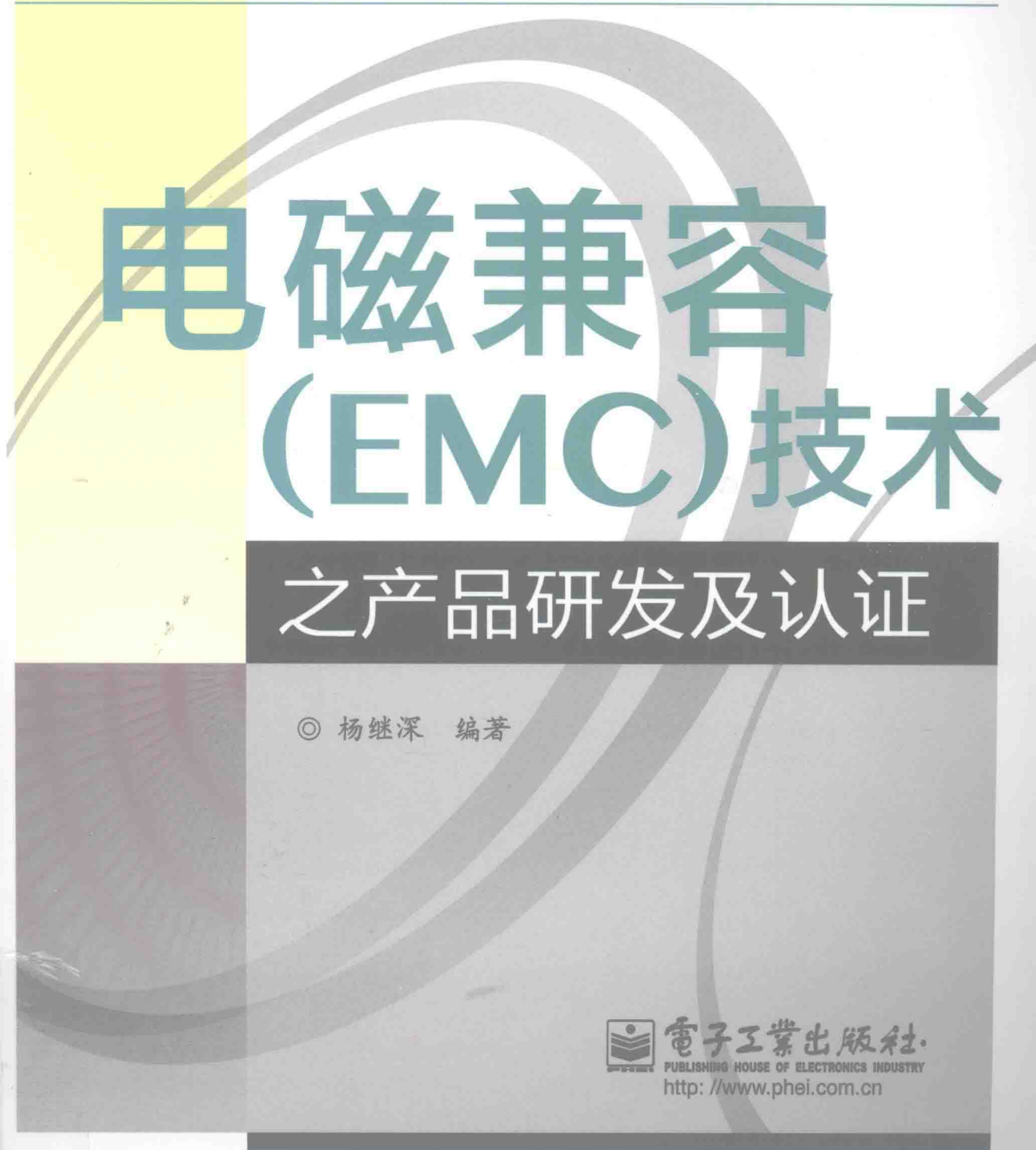


电磁兼容 (EMC) 工程技术丛书



电磁兼容 (EMC) 技术

之产品研发及认证

© 杨继深 编著

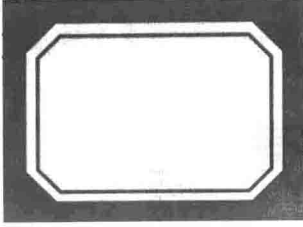


电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电磁兼容 (EMC) 工程技术丛书



容 (EMC) 技术



产品研发及认证

杨继深 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以产品为对象,从工程实践的角度讲解电磁兼容的基本概念、设计技术,以及出现电磁兼容问题时的分析思路,目的是使读者学会如何使所设计的产品顺利通过电磁兼容试验。本书主要内容包括电磁兼容的基本概念、电磁兼容试验的基础知识、电磁屏蔽技术、电磁干扰滤波技术、接地设计、电缆的电磁干扰对策、线路板的电磁兼容设计、通过电磁兼容试验的关键设计点、电磁兼容问题的诊断等。在编写方式上,既避免烦琐的公式推导,又防止就事论事,通过物理概念的讲解,使读者了解电磁兼容的核心内容,培养读者解决电磁兼容问题的能力。

本书适合电子产品的设计人员,电子系统、信息系统、自动控制系统的设计人员,信息系统、自动控制系统的集成人员和维护人员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容(EMC)技术之产品研发及认证 / 杨继深编著. —北京:电子工业出版社,2014.8

(电磁兼容(EMC)工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-23867-3

I. ①电… II. ①杨… III. ①电磁兼容性—电子产品—产品开发②电磁兼容性—电子产品—认证

①F407.636.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第166100号

策划编辑:张榕

责任编辑:夏平飞 特约编辑:郭茂威

印刷:北京季蜂印刷有限公司

装订:北京季蜂印刷有限公司

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

开本:787×1092 1/16 印张:26 字数:677千字

版次:2014年8月第1版

印次:2014年8月第1次印刷

印数:3000册 定价:68.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前言

《《《《 PREFACE

本书是在《电磁兼容技术之产品研发与认证》的基础上完成的，不过它是按照一种全新的思路进行改写的。2004 年至今的十年中，笔者在各类培训中一直使用《电磁兼容技术之产品研发与认证》作为基本教材。因此，具备了直接从读者那里收集意见的机会。读者除了给予那本书大量的赞赏之外，也提供了很多修改意见，更可贵的是很多读者听说笔者有改写的想法后，对新书的出版充满了期望。正是在读者的热切希望下，我才下决心进行改写。另外，当我把改写的想法说给张蓉编辑后，她不仅积极鼓励，而且将原来计划的时间缩短，希望尽快出版这本新书。

促成笔者尽快完成这本书的原因还有一个，即在技术咨询的过程中，发现很多问题其实并不是很复杂的问题，但是工程师们在处理问题时都没有正确的思路，走了很多弯路，浪费了大量的时间。他们一边翻看书本，一边生搬硬套，采取的很多措施让人啼笑皆非。当看到工程师们桌子上摆放着厚厚一摞电磁兼容书籍，但是从中找不到正确解决问题方法时，感到十分焦急，坚定了要尽快编写一本实用图书的决心。

在策划本书时，遇到的最大困惑之一就是重点放在哪里。因为，电磁兼容技术涉及的领域很宽，面面俱到不仅篇幅不允许，而且对于读者也是无益的。读者可能花费了大量的时间阅读，但是不能够解决自己的问题。这在信息爆炸、工作节奏渐快的时代十分不适宜。为了解决这个问题，我决定从实践中寻找答案。通过回顾 15 年来从事电磁兼容培训和咨询中学员们感到不好理解的问题，与各个领域的工程师们讨论过的问题，以及现场遇到的实际问题，对这些问题进行归纳和分类，本书应该聚焦的内容逐渐显现了出来。在这个基础上，本着兼顾实用性和知识系统性的原则定出了各个章节的主题。因此，本书不仅是笔者 25 年来相关知识和工程经验的总结，还是工作在各个领域的广大工程师的经验总结。

本书在编写过程中，尽量通过物理概念解释现象，少用公式推导。特别是，现在电磁场计算和电磁兼容分析的软件工具很多，只要物理概念清楚了，能够建立正确的模型，计算并不需要硬件开发工程师们来做。另外，本书还省略了一些电磁兼容专用器件、屏蔽材料等的指标参数，主要目的是节省篇幅，也考虑到读者真正要使用这些参数时，很容易从厂家获得，并得到厂家的指导。

本书最大的改进之处有两个，一个是增加了更多的示意图。在过去的培训中，学员们对于 PPT 课件资料十分欢迎。这种资料，每页是一个主题，配以一张示意图，然后在备注页是关于示意图的说明，就像儿童喜欢的连环画。这种形式使阅读更加轻松，并且主题鲜明。随着多媒体技术的发展，人们越来越习惯于这种结合图示进行说明的方式。本书试图将这种优点融入进来，增加本书的阅读性，良好的阅读性也是本书编写时追求的目标。为了达到这一目的，大量的示意图是不可避免的，这些图虽然占据了不少的版面，但是使读者在理解方面轻松了很多。本书中采用的图大部分来自互联网。正如大家所了解的，互联网的信息传播很



广泛，很多图的原始来源不是很清楚，因此，除非来源很清楚的图进行了来源的标注以外，一般的图没有注明其来源。

另一个重要改进是增加了更多的实践内容，也就是工程、试验方面的具体方法。过去认为，只要读者学会了理论和基本原理，自然会在实际中应用这些知识去解决问题，而不舍得花费版面介绍具体的做法。然而，在培训中发现，很多学员提的疑问恰恰是这些实际的问题。实际上，在学习和掌握任何知识的过程中，案例都是帮助理解的最好工具。在数学、物理的学习中，我们通过研究例题，才能学会应用所学的定理来解决问题。因此，本书中不吝笔墨地对一些具体的做法进行了介绍。

本书的编写中，特别注意理论与实践的结合，希望读者不仅要学会怎样处理书中介绍的常见问题，还要运用相关的知识来分析、解决遇到的特殊问题。笔者感到，制约工程师们掌握电磁兼容技术的一个主要原因是缺少好的教材。市场上的书籍大致分为两类，一类是面向高校学生的，公式推导占了大量篇幅，却很难找到一些对实际工程有指导意义的内容。另一类是面向实践的，但是其中内容大多以设计规则、实际案例为主，缺乏理论的阐述。读者遇到问题时，可以翻看，从中查找类似的情况，然后照猫画虎、生搬硬套。虽然能够解决一定的实际问题，但是很难培养工程师解决问题的能力。将理论与实践统一起来，培养工程师解决问题的能力是编写本书的目的之一。

本书阅读起来可能比较容易，因为这正是本书所追求的目标。本书内容涉及产品电磁兼容设计中的各个方面，掌握了这些内容，完全能够满足产品研发的要求。本书适合于具有一定实践经验，并且迫切需要解决电磁兼容问题的工程师。对于刚走出校门的毕业生来说，可能体会不到其中的奥妙，但是随着工作经验的积累，会逐渐领会其中的内容。本书共分 9 章。

第 1 章，介绍电磁兼容技术中用到的基础知识，对电磁兼容三要素进行了较详细的讨论，这些是我们分析电磁兼容问题的基础。另外还用了较大的篇幅对共模电流进行了介绍。很多电磁兼容的问题是由电缆上的共模电流导致的，但是一般教科书上对共模电流的叙述很简单，不能指导对具体问题的分析。本书从电磁兼容的角度进行了细致的讨论。电子设备的辐射性骚扰发射是工程师们感觉最难处理的问题，电磁波辐射是通过天线实现的，本章简单介绍了天线的辐射特性。频域分析是电磁兼容中常用的分析方法，是工程师们必须掌握的一种技能。电磁兼容计量中常用分贝这个单位，这个单位的定义虽然简单，但如果理解不透彻，会给工作带来不小的麻烦，本章中结合电磁兼容问题分析对其中的要点做了提示。

第 2 章，对电磁干扰的耦合路径做了细致的介绍。在电磁兼容的三要素中，骚扰源和敏感源往往都比较明显，但是耦合路径分析起来往往比较困难。通过本章的学习，能够对耦合路径有清晰的概念，在遇到电磁兼容问题时，能够目标明确地分析耦合路径，在进行硬件设计时，能够有意识地减小耦合。

第 3 章，对地线进行了详细的讨论。地线引起的电磁兼容问题是很多工程师所困惑的。在实际中，经常与工程师们讨论地线的正确设计方法，发现很多观点都是似是而非的，有些是想当然的结果。本章试图使读者对地线形成一个比较系统的概念，并用这些概念分析地线系统的问题，能够设计出一个电磁兼容性风险最小的地线系统。虽然一个系统的地线设计结果并不是唯一的，但是希望本章所介绍的方法能使工程师设计的地线系统问题最少。

第 4 章，对电磁屏蔽技术做了介绍。电磁屏蔽技术是电磁兼容设计中的重要技术之一，但是很多工程师不知道如何实现良好的电磁屏蔽，很多人将良好的接地作为一个重要的条件，



而忽略了真正重要的因素。本章不仅介绍电磁波屏蔽的理论，更强调了做好电磁屏蔽要注意的工程细节，如电磁密封材料的选用、腐蚀的控制等。

第5章，介绍了电磁干扰滤波的相关理论和实践知识。很多工程师不重视电磁干扰滤波在保证设备电磁兼容性中的作用。实际上，从某种意义上讲，电磁干扰滤波对于保证设备的电磁兼容性的重要性超过电磁屏蔽与接地设计。本章首先介绍电磁干扰滤波与电磁兼容的关系，然后介绍电磁干扰滤波的特点，之后花费了大量的篇幅介绍电磁干扰滤波在工程实践中需要注意的问题与滤波器的实现方法。

第6章，介绍电路与线路板的电磁兼容设计方法。本章实际上是前面各章介绍的基本概念的实际应用方法。电路设计的核心是频谱和电路带宽的控制，而这些主要靠滤波来实现。电磁干扰滤波的知识是这种应用的基础。本章介绍了扩谱时钟技术的应用，这实际上是傅里叶分析技术的一种应用。线路板设计的方法则主要是地线概念、耦合概念的应用。通过本章的学习，读者不仅可以学习到具体的电路和线路板电磁兼容设计的方法，而且还能体会到基础理论知识对实际工程的指导作用。

第7章，介绍了电缆的电磁兼容设计方法。从电磁兼容角度考虑，电缆是设备中最重要的因素。不仅从理论上讲，电缆是电磁辐射与接收电磁波的良好天线，还因为很多电磁兼容性试验与电缆密切相关。因此，做好电缆的电磁兼容设计，对于保证设备顺利通过电磁兼容试验、减小系统中的电磁兼容风险至关重要。

第8章和第9章，主要以电磁兼容试验项目为线索，介绍了如何顺利通过电磁兼容试验的方法。对于一些急迫想要通过电磁兼容试验的读者，可以直接阅读这两章中的相关内容，然后进行实践。虽然可能对于为什么要那样做不清楚，但是可以大大提高通过试验的概率。当然，如果读者具备了前面各章的基础知识，再按照这里介绍的方法去做，可以更加轻松，并且通过试验的概率更高。实际上，如果能够完全理解本书中各章介绍的内容，所开发的产品基本上可以一次通过电磁兼容试验。

由于本书的编写主要利用业余时间，为了完成本书，牺牲了很多与家人、朋友在一起的时间，而他们表示了谅解，并给予了鼓励，在此对他们的支持和帮助表示感谢。在本书的编写过程中，电子工业出版社的张蓉编辑给予了密切的关注，并提出了一些有益的建议，从而加快了本书的进度，在此表示感谢。我的研究生王堃兆同学对本书中的公式和图表进行了整理和校对，在此表示感谢。

编著者

目录

<<<< CONTENTS

第 1 章 基础知识	(1)
1.1 电磁兼容	(1)
1.1.1 什么是电磁兼容	(1)
1.1.2 电磁兼容标准	(2)
1.1.3 电磁兼容设计的目的和内容	(4)
1.2 电磁兼容的三要素	(5)
1.2.1 电磁骚扰源的特性	(6)
1.2.2 电磁敏感源的特性	(9)
1.2.3 电磁骚扰耦合路径	(10)
1.3 共模电流	(11)
1.3.1 位移电流	(11)
1.3.2 共模电流	(12)
1.4 电磁波的辐射	(15)
1.4.1 基本天线结构	(15)
1.4.2 实际电路的辐射	(17)
1.4.3 波阻抗	(18)
1.4.4 寄生天线	(19)
1.5 频域分析	(19)
1.5.1 傅里叶变换	(20)
1.5.2 梯形波的频谱包络线	(22)
1.5.3 脉冲频谱的控制	(24)
1.5.4 频谱分析仪的原理与应用	(25)
1.6 分贝的概念	(26)
1.6.1 分贝的定义	(26)
1.6.2 分贝在电磁兼容中的应用	(27)
第 2 章 电磁干扰的耦合路径	(30)
2.1 电源形成的耦合路径	(30)
2.1.1 电源形成耦合路径的原理	(30)
2.1.2 电源线耦合的解决	(33)
2.2 地线的耦合路径	(36)
2.2.1 地线耦合的机理	(36)
2.2.2 地线耦合的解决	(38)
2.3 电容耦合	(39)



2.3.1	电容耦合的机理	(39)
2.3.2	电容耦合的消除	(40)
2.4	磁场耦合	(42)
2.4.1	磁场耦合的机理	(42)
2.4.2	磁场泄漏的控制	(43)
2.4.3	磁场接收的控制	(44)
2.4.4	通过实验加深理解	(49)
2.5	导线之间的串扰	(52)
2.6	电磁场耦合	(55)
第3章	地线与电磁兼容的关系	(58)
3.1	地与接地的概念	(58)
3.1.1	什么是地	(59)
3.1.2	什么叫接地	(59)
3.1.3	防静电接地	(62)
3.2	电路地	(63)
3.2.1	电路地的定义	(63)
3.2.2	习惯用地线电流的概念分析干扰问题	(65)
3.3	地线的阻抗	(66)
3.3.1	导线的阻抗	(67)
3.3.2	信号回路的阻抗	(70)
3.4	地线干扰形成的原因	(71)
3.5	地环路干扰问题	(73)
3.5.1	地环路干扰现象	(73)
3.5.2	地环路问题的对策	(74)
3.6	公共地线阻抗导致的干扰问题	(80)
3.7	地线的设计原则	(81)
3.7.1	从地线的目的出发	(81)
3.7.2	对地线导体的要求	(82)
3.7.3	单点接地	(83)
3.7.4	多点接地	(84)
3.7.5	混合接地	(85)
3.8	地线系统的实现	(86)
3.8.1	金属搭接	(86)
3.8.2	搭接的可靠性	(90)
3.8.3	数字电路的地线设计	(92)
3.8.4	混合电路的地线设计	(96)
3.8.5	线路板地线与机壳的连接	(98)
第4章	电磁屏蔽技术	(101)
4.1	屏蔽效能的定义	(101)



4.2	实心屏蔽材料的屏蔽效能	(104)
4.2.1	反射损耗	(105)
4.2.2	吸收损耗	(108)
4.2.3	多次反射修正因子	(109)
4.2.4	综合屏蔽效能	(109)
4.3	低频磁场的屏蔽方法	(110)
4.4	影响屏蔽体屏蔽效能的关键因素	(112)
4.4.1	孔洞的泄漏	(113)
4.4.2	缝隙的泄漏	(114)
4.5	缝隙的处理	(115)
4.6	电磁密封衬垫的正确使用	(117)
4.7	截止波导管	(122)
4.8	屏蔽面板的屏蔽设计	(124)
4.9	导电涂覆层	(125)
第5章	电磁干扰滤波技术	(127)
5.1	电磁干扰滤波在电磁兼容设计中的作用	(127)
5.1.1	概述	(127)
5.1.2	与滤波有关的电磁兼容问题举例	(129)
5.2	差模和共模电流	(132)
5.2.1	差模电流	(132)
5.2.2	共模电流	(133)
5.3	滤波器的插入损耗	(134)
5.3.1	插入损耗的定义	(134)
5.3.2	插入损耗的测量	(135)
5.4	电磁干扰滤波器的电路设计	(138)
5.4.1	电磁干扰滤波器的基本电路	(138)
5.4.2	电容的接地点	(140)
5.4.3	电路的器件数量	(141)
5.4.4	电路形式的确定	(142)
5.4.5	电路参数的确定	(143)
5.5	滤波器实现中的问题	(144)
5.5.1	实际滤波器的插入损耗	(144)
5.5.2	滤波电容的因素	(145)
5.5.3	滤波电感的因素	(147)
5.5.4	屏蔽对滤波电路的影响	(148)
5.5.5	滤波器结构的因素	(148)
5.6	滤波电容器的使用	(150)
5.6.1	滤波电容的种类	(150)
5.6.2	滤波电容的并联使用	(151)



5.6.3	减小滤波电容引线的影响	(153)
5.6.4	穿心电容器	(155)
5.7	电感器件的基本概念	(158)
5.7.1	电感的定义	(158)
5.7.2	电感的计算	(159)
5.8	电感器件的磁芯	(160)
5.8.1	磁性材料	(160)
5.8.2	磁性材料的主要特性指标	(163)
5.8.3	铁氧体材料	(166)
5.8.4	磁粉芯	(172)
5.8.5	非晶材料	(174)
5.9	电感器件的制作方法	(175)
5.9.1	制作电感器件需要考虑的主要问题	(176)
5.9.2	电感绕制的方法	(177)
5.10	滤波器的插入增益问题	(180)
5.11	低通滤波器对脉冲干扰的抑制作用	(181)
第6章	电路与线路板的电磁兼容设计	(184)
6.1	概述	(184)
6.1.1	电路设计与电磁兼容的关系	(184)
6.1.2	线路板设计与电磁兼容的关系	(185)
6.2	时钟电路设计	(186)
6.2.1	时钟频率	(186)
6.2.2	时钟信号的滤波	(186)
6.2.3	扩谱技术	(187)
6.3	I/O 端口的设计	(189)
6.3.1	使用平衡电路提高抗干扰性	(189)
6.3.2	I/O 端口滤波设计	(192)
6.4	传输线	(195)
6.4.1	传输线的构成	(195)
6.4.2	传输线的传输特性	(196)
6.4.3	传输线的反射	(199)
6.5	线路板上的电源线设计	(201)
6.5.1	电源线的噪声	(201)
6.5.2	电源解耦设计	(203)
6.6	线路板上的地线设计	(207)
6.6.1	地线上的电流分布	(207)
6.6.2	地线的阻抗	(210)
6.6.3	地线面上的电压	(213)
6.7	线路板电磁辐射的机理	(215)





6.7.1	线路板电磁辐射的机理	(215)
6.7.2	线路板外拖电缆电磁辐射的机理	(219)
6.8	线路板的设计	(224)
6.8.1	线路板的布局	(224)
6.8.2	I/O 端口的设计	(225)
6.8.3	控制信号电流的回路面积	(229)
6.8.4	多层线路板的使用	(232)
6.8.5	信号线的换层	(237)
6.9	线路板与金属机箱的连接	(238)
6.10	线路板上串扰的控制	(240)
6.11	线路板之间的互连	(241)
6.12	线路板的局部屏蔽	(244)
第 7 章	电缆设计	(247)
7.1	电缆的辐射问题	(247)
7.1.1	差模电流转换成共模电流	(250)
7.1.2	线路板的地线噪声导致的共模电流	(251)
7.1.3	机箱内电磁场空间感应导致的共模电流	(251)
7.2	电缆共模辐射的估算	(252)
7.3	电缆共模辐射的抑制	(256)
7.3.1	增加共模电流回路的阻抗	(256)
7.3.2	减小共模电压	(258)
7.3.3	共模滤波	(259)
7.3.4	电缆屏蔽	(261)
7.4	电缆的屏蔽	(261)
7.4.1	电缆屏蔽控制共模辐射的原理	(261)
7.4.2	发挥屏蔽电缆效果的关键	(262)
7.4.3	电缆屏蔽效能的度量	(266)
7.5	电缆的分类布局	(271)
7.5.1	电缆芯线之间的信号串扰	(271)
7.5.2	电缆之间的信号串扰	(272)
7.5.3	电缆分类	(272)
7.6	电磁场对电缆的影响	(273)
7.6.1	场与电缆之间的耦合	(273)
7.6.2	场与电缆之间耦合的控制	(275)
第 8 章	骚扰发射的控制	(278)
8.1	骚扰发射的要求与测量	(278)
8.1.1	对骚扰发射的限制	(278)
8.1.2	谐波电流发射试验	(282)
8.1.3	射频传导骚扰发射的测量	(282)



8.1.4	电源线功率发射试验	(286)
8.1.5	辐射骚扰发射的测量	(287)
8.2	开关电源的基本原理和干扰特征	(288)
8.2.1	开关电源的基本原理	(288)
8.2.2	开关电源的干扰特征	(292)
8.2.3	开关电源的共模干扰模型	(294)
8.3	开关电源的骚扰发射机理分析	(296)
8.3.1	开关电源的差模传导发射	(296)
8.3.2	开关电源的共模传导发射	(296)
8.4	开关电源传导发射的控制原理	(298)
8.4.1	差模传导发射的控制原理	(298)
8.4.2	共模传导发射的控制原理	(299)
8.5	电源线滤波器	(302)
8.5.1	电源线滤波器的种类	(302)
8.5.2	电源线滤波器的基本电路	(303)
8.5.3	电源线滤波器的插入损耗要求	(305)
8.5.4	共模电感的制作方法	(308)
8.5.5	差模电感的设计与制作	(308)
8.5.6	滤波电容的选择	(311)
8.5.7	提高电源线滤波器高频插入损耗的方法	(312)
8.5.8	滤波器的安装方式	(315)
8.5.9	成品滤波器选择的误区	(316)
8.6	辐射发射的控制	(317)
8.6.1	电路设计要点	(318)
8.6.2	线路板的设计要点	(319)
8.6.3	机箱屏蔽	(320)
8.6.4	电缆的处理	(320)
8.6.5	电源线滤波	(320)
8.7	骚扰发射超标问题的诊断	(322)
8.7.1	诊断骚扰发射超标问题的正确步骤	(322)
8.7.2	骚扰发射诊断的设施与设备要求	(325)
8.7.3	传导骚扰发射的诊断	(328)
8.7.4	辐射骚扰发射的诊断	(330)
8.7.5	辐射发射整改的例子	(331)
第9章	抗扰性设计	(345)
9.1	电快速脉冲试验与对策	(345)
9.1.1	电快速脉冲试验	(345)
9.1.2	电快速脉冲试验模拟的电磁环境	(349)
9.1.3	电快速脉冲试验对电子设备的影响	(351)



9.1.4	电源线通过电快速脉冲试验的措施	(351)
9.1.5	信号线通过电快速脉冲试验的措施	(353)
9.2	浪涌试验与对策	(356)
9.2.1	浪涌试验	(356)
9.2.2	浪涌试验代表的电磁环境	(360)
9.2.3	浪涌对电子设备的损伤	(363)
9.2.4	浪涌保护器件	(364)
9.2.5	浪涌保护实践	(369)
9.2.6	浪涌试验失败的诊断	(373)
9.3	GJB151A 中的 CS101 试验	(373)
9.3.1	CS101 试验	(373)
9.3.2	通过 CS101 的方法	(375)
9.4	GJB151A 中的 CS106 试验	(375)
9.4.1	CS106 试验	(375)
9.4.2	通过 CS106 试验的方法	(376)
9.5	GJB151A 中的 CS114 试验	(377)
9.5.1	CS114 试验	(377)
9.5.2	通过 CS114 试验的方法	(379)
9.6	GJB151A 中的 CS115 试验	(382)
9.6.1	CS115 试验	(382)
9.6.2	通过 CS115 试验的方法	(382)
9.7	GJB151A 中的 CS116 试验	(383)
9.7.1	CS116 试验	(383)
9.7.2	通过 CS116 试验的方法	(384)
9.8	辐射抗扰度(敏感性)试验	(384)
9.8.1	辐射抗扰度试验	(384)
9.8.2	通过辐射抗扰度试验的设计方法	(386)
9.9	静电放电试验	(388)
9.9.1	静电放电试验	(388)
9.9.2	设备接触式直接放电对电路的影响与防护	(391)
9.9.3	设备非接触式直接放电对电路的影响与防护	(395)
9.9.4	金属面板上的操作器件的处理	(396)
9.9.5	I/O 端口静电放电的解决	(396)
	参考文献	(398)

第1章

基础知识

1.1 电磁兼容

1.1.1 什么是电磁兼容

电磁兼容有两个含义，一个是设备或者系统在预定的电磁环境中能够正常工作，另一个是两个以上的电子设备或者系统同时工作时，相互之间不会产生电磁干扰的状态。

由于电子设备的大量应用，以及人们对电子设备的高度依赖，电磁兼容性已成为最受关注的领域之一。电磁兼容的概念已经深入到了生活中每个环节。例如，在乘坐飞机时，乘务人员要反复提醒乘客关闭手机，这就是要防止手机的发射信号对飞机的通信系统、控制系统产生不良影响。

又例如，如图 1-1 所示两个设备，一个是电视机，另一个是振动按摩垫。这两种设备经常同时工作，一边看电视，一边按摩背部。但是发现，两者并不能同时工作。因为当按摩垫工作时，电视机的屏幕上出现了干扰的情况，就是按摩垫与电视机没有达到电磁兼容的状态。

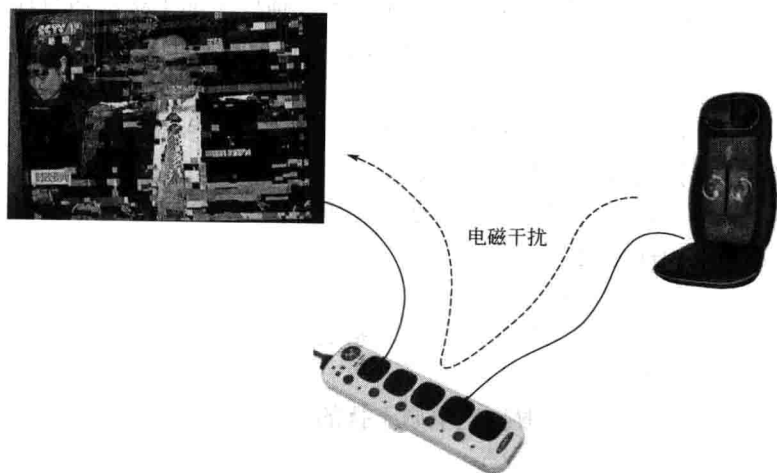


图 1-1 按摩垫与电视机之间没有达到电磁兼容状态

电磁兼容性不好还体现在设备或者系统在预定的电磁环境中不能正常地工作。例如，2012



年 7 月发生的高铁追尾事故 (见图 1-2), 当时正处于雷电气候, 关于事故原因的一种说法是高铁的信号控制系统在雷电的影响下出现了误动作, 发出了错误的行车信号。如果确实是这样, 就说明信号系统没有达到电磁兼容的状态, 因为雷电是自然界中很常见的现象, 信号系统在设计时必须考虑与这种环境兼容。实际上, 我们在乘坐高铁列车时确实发现, 如果有雷电天气, 列车就会降低速度, 因此在雷雨季节高铁列车经常会出现晚点的情况。



图 1-2 高铁信号系统与自然环境没有达到电磁兼容状态

雷电是一种常见自然现象, 雷电实际就是静电放电的过程, 在发生雷电的过程中, 会产生强大的电磁场, 这种电磁场会对电子设备产生干扰, 轻者导致数据错误, 重者导致硬件损坏。这是所有在地球上使用的电子设备都必须考虑的问题, 要采取适当的防护措施, 保证电子设备或者系统不受雷电的影响。

实际上, 电磁兼容问题并不是最近才出现, 自从 20 世纪的 20 年代, 广播通信发明以来, 人们就开始研究无线电干扰 (电磁干扰) 导致的各种问题。30 年代, 人们对电磁干扰已经有了相当多的研究和认识, 所研究的问题不仅限于无线电广播产生的干扰, 而且还涉及马达、电器开关以及汽车点火装置对无线电广播所产生的干扰。

在 1933 年, 针对越来越严重的电磁干扰问题, 国际电工委员会 (IEC) 成立了国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)。1934 年, CISPR 召开了第一次会议, 主要议题是确定一个合理的无线干扰限制值, 以及如何对电磁干扰进行测量。

第二次世界大战中, 由于远程通信和雷达在军事上的应用, 极大地促进了电磁兼容问题的研究, 一些军用标准和规范随之诞生。

今天, 电子技术已经深深地融入各行各业, 电磁干扰的问题也愈加突出。如何使电子设备达到电磁兼容的状态也成为产品开发工程师、系统集成工程师以及用户关心的问题, 同时也成为政府管理工作的一部分。

在电子设备和系统的设计中采取控制电磁干扰的措施, 使电子设备和系统能够达到电磁兼容的状态, 就是本书讨论的主要内容。

1.1.2 电磁兼容标准

为了使电子设备达到电磁兼容状态, 各国政府都出台了电磁兼容标准。电磁兼容标准的

制定基于两项工作的基础，第一项是对现实环境中的电磁干扰现象的研究，包括电磁干扰是怎样产生的，它的幅度、频率是怎样的。第二项是对电子设备受电磁干扰的机理的研究。在这两项研究的基础上，制定了电磁兼容标准，标准规定了电子设备需要进行的试验项目，每项试验的具体实施方法以及每项试验通过与否的判据。当设备满足了电磁兼容标准的要求时，在实际环境中可以可靠地工作。

电磁兼容标准分为基础标准、通用标准、产品类标准和专用产品标准等四种：

(1) 基础标准：描述了 EMC 现象、规定了 EMC 测试方法、设备，定义了等级和性能判据；

(2) 通用标准：是按照设备使用环境划分的，当产品没有特定的产品类标准可以遵循时，使用通用标准来进行 EMC 测试。

(3) 产品类标准：针对某种产品系列的 EMC 测试标准。往往引用基础标准，但根据产品的特殊性提出更详细的规定。产品类标准主要从电磁骚扰发射和抗扰度两个方面对产品的电磁兼容性进行规定。

(4) 专用产品标准：专用产品标准通常不单独形成电磁兼容标准，而以专门条款包含在产品的通用技术条件中。专用产品标准对电磁兼容的要求与相应的产品族标准相一致，在考虑了产品的特殊性之后，也可增加试验项目和对电磁兼容性能要求作某些改变。与产品族标准相比，专用产品标准对电磁兼容性的要求更加明确，而且还增加了对产品性能试验的判据。对试验方法，应由试验人员参照相应基础标准进行。

产品类标准对产品的电磁兼容要求主要包括标如图 1-3 所示的几方面内容。

(1) 两方面要求：首先从两个方面对设备提出要求，一个是工作时不会对外界产生不良的电磁干扰影响，另一个是不能对外界的电磁骚扰过度敏感。前一个要求称为骚扰发射要求，后一个要求称为敏感性或抗扰度要求，在本书中这两个术语通用。

(2) 能量传播的途径：在每个方面的要求中，又按照电磁能量传播的方式进行划分。一种方式是以电磁波的形式通过空间传播，另一种方式是以电流的形式沿导线传播。因此，电磁骚扰发射可以分为传导发射和辐射发射；敏感性也可以分为传导敏感性和辐射敏感性。

(3) 静电放电：静电放电试验独立于传导敏感性、辐射敏感性试验，因为它对设备造成干扰的机理十分复杂。

传导发射、辐射发射、传导敏感性、辐射敏感性等四个方面的试验项目又根据不同的干扰种类、频率范围和试验方法进行细分，由此得到许多不同的试验项目。划分这么多的试验项目的目的就是能全面模拟实际的电磁环境。

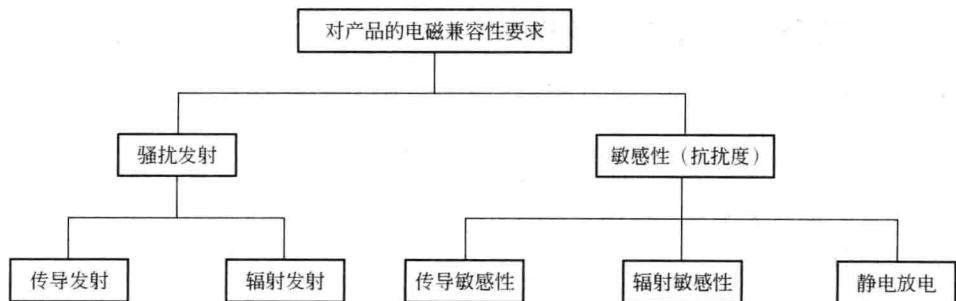


图 1-3 电磁兼容标准的内容



制定电磁兼容标准是一件十分复杂的工作,需要投入大量的人力、财力。因此,许多国家都直接采用 IEC 制定的标准。

IEC 有两个平行的组织负责制定 EMC 标准,分别是 CISPR 和 TC77(第 77 技术委员会)。CISPR 制定的标准编号为: CISPR Pub. $\times\times$, TC77 制定的标准编号为 IEC $\times\times\times\times$ 。

CISPR 机构目前有七个分会:

- A 分会 (无线电干扰测量方法与统计方法);
- B 分会 (工、科、医射频设备的无线电干扰);
- C 分会 (电力线、高压设备和电牵引系统的无线电干扰);
- D 分会 (机动车和内燃机的无线电干扰);
- E 分会 (无线接收设备干扰特性);
- F 分会 (家电、电动工具、照明设备及类似电器的无线电干扰);
- G 分会 (信息设备的无线电干扰)。

TC77 机构是 1981 年成立的,目前有 3 个分会: SC77A (低频现象)、SC77B (高频现象)、SC77C (对高空核电磁脉冲的抗扰性)。

我国的民用产品电磁兼容标准基于 CISPR 和 IEC 标准,目前已发布 57 个,编号为 GB $\times\times\times-\times\times$, 例如 GB 9254—2008。

欧盟使用的 EN 标准也是基于 CISPR 和 IEC 标准,其对应关系如下:

- EN5 $\times\times\times$ = CISPR 标准, 如 EN55011 = CISPR Pub.11;
- EN6 $\times\times\times$ = IEC 标准, 如 EN61000-4-3 = IEC61000-4-3 Pub.11;
- EN50 $\times\times\times$ = 自定标准, 如 EN50801。

我国的国家标准 (GB) 也是引用 CISPR 的标准。军用标准 (GJB151A、GJB152A) 是引用美国军标 MIL-STD-461D 和 MIL-STD-462D。

标准中规定的各项电磁兼容试验实际上是对现实情况的一个反映,因此,采取设计措施满足这些试验的要求能够大大减少设备、系统出现电磁干扰问题的概率。笔者处理过很多电磁干扰的问题,包括一些尚在研制过程中就已经出现了严重的电磁干扰问题而不能继续进行研制的设备和系统,实际上都是因为在设计时没有针对通过电磁兼容试验而采取必要的措施。

另外,对于产品通过电磁兼容试验还需要有另一个正确的认识,这就是产品通过了电磁兼容试验并不意味着在实际使用环境中,就绝对不会出现电磁干扰的问题,因为电磁兼容标准仅仅是针对典型电磁环境制定的,并不是针对所有电磁环境的。

1.1.3 电磁兼容设计的目的和内容

电磁兼容设计的目的有两个,一个是保证电路之间、模块之间、系统内部的自兼容,另一个是顺利通过电磁兼容试验。

随着电磁兼容要求纳入强制认证,大部分硬件设计师已经开始有意识开展电磁兼容设计,当然设计的主要目的是为了通过电磁兼容性试验。而电路、模块之间的自兼容问题往往是在调试的过程中进行解决。

实际上,任何一项电磁兼容性设计往往会改善整个系统的电磁兼容性。尽管我们针对如何通过电磁兼容性试验采取了各种设计措施,但是这些措施往往对于改进电路的自兼容性也十分有益。