

电磁兼容应用技术丛书

电磁兼容的实用 技术、技巧和工艺

王守三 ○ 编译

DIANCI JIANRONG DE
SHIYONG JISHU JIQIAO HE GONGYI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电磁兼容应用技术丛书

电磁兼容的实用技术、 技巧和工艺

王守三 编译



机械工业出版社

本书着重介绍电磁兼容设计过程中能灵活采用的实用技术、技巧及工艺,并对多种实用技术、技巧及工艺进行性价比等方面的比较,最后提出最佳或折中方案向读者推荐。本书共分6章,包括电磁兼容的电路设计和元器件的选择;电缆和连接器;滤波器和浪涌保护装置;屏蔽;PCB设计和布局;静电放电、电压跌落、电压闪变和下降、机电开关和功率因数校正。文后还附有文中出现的英文缩略语图解。

本书适合从事电磁兼容设计、管理的人员阅读,也适合参加电磁兼容培训的师生。

图字:01-2006-4184号

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容的实用技术、技巧和工艺/王守三编译. —北京:机械工业出版社,2007.2

(电磁兼容应用技术丛书)

ISBN 978-7-111-20653-8

I. 电... II. 王... III. 电磁兼容性 IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第162340号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:罗莉 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2007年2月第1版第1次印刷

148mm×210mm·10.125印张·299千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-20653-8

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

序

本书是“电磁兼容应用技术丛书”的第一本。该丛书以每本介绍和讨论一个专题为原则。目前计划出版的四个专题分别是

1. 电磁兼容的实用技术、技巧和工艺
2. PCB 的设计技术、技巧和工艺
3. 设备和系统的电磁兼容性
4. 电磁兼容的测试和测量

本丛书的最终目的是希望读者在阅读或在参考使用过程中能够切实实地解决所面临的实际电磁兼容 (EMC) 技术和应用问题。所以,不论是本书还是本丛书的后续各册在内容的编排上都是以上述这个目的为出发点的。例如,本书所安排的内容包括有

1. 电路设计 (数字、模拟、开关模式、通信) 和元器件的选择
2. 电缆和连接器
3. 滤波器和浪涌保护装置 (瞬态抑制器)
4. 屏蔽
5. 印制电路板 (PCB) 的设计和布局 (包括传输线)
6. 一些特殊问题 (静电放电、机电结合器件和功率因数校正)

正如读者所知,虽然以上所列的任何一个题目都可以写成一本完整的教科书。但如上所述,本书的出发点和目的却与教科书完全不同。

本书 (以及本丛书的后续各册) 是希望在有限的篇幅内,将最为重要的一些电磁兼容 (EMC) 设计上的应用技术和技巧 (甚至包括一些重要的工艺手段) 以简洁明了的语言和较为全面的方式介绍给广大的读者和从事 EMC 设计的工程技术人员。因此尽可能地避免那些在任何一本教科书中都可以找到的基本概念、理论介绍和冗长的数学推导和建模,取而代之的是尽可能多地使用通俗语言的表述、经验方法和实用数据以及大量的插图,以做到理解容易、数据随手可得和一

目了然。因此读者在阅读本书时，并没有必要像阅读一本教科书那样从头到尾“循序渐进”地阅读，而是以实用主义为出发点，需要解决哪方面的问题就参阅有关章节，从中选择最适合读者本身情况的解决办法。在市场经济和经济全球化的今天，要使一个电子产品立于不败之地，上述的“捷径”不失为可供选择的方法之一。当然，本书自始至终所强调的一点是：从设计的一开始就应尽可能及早地考虑将产品的 EMC 性能作为设计的一个重要组成部分引入到研发过程中，而不要等到出现问题时再寻求解决办法。到那时不仅耗时耗力，造成产品进入市场的推迟，甚至造成产品无法通过 EMC 认证，从而无法投放市场。

但我也意识到，由于 EMC 应用技术的不断发展与改进，还有许多本书以及本丛书后续各册中并未涉及到的技术和技巧，或由于篇幅的限制而对有些技术和技巧的讨论方式方法过于简捷，但作为一套丛书，本书及本丛书的后续各册仍不失为一套较为系统和较为全面向读者介绍 EMC 技术应用问题的重要参考书。在编译过程中，我特别将注意力集中在突出介绍设计过程中能灵活采用的实用技术、技巧以及工艺手段，并且考虑到如何能将它们有效地运用到实际应用中来解决所出现的和需要解决的实际问题上。而对所出现的实际问题又希望尽可能多地提出多种解决方案，不仅对它们技术性能上的优缺点进行逐项比较，而且要对它们的性价比进行比较。最后再提出“最佳”或“折中”解决方案向读者推荐，或者读者根据自己的实际情况和条件选择解决方案。这里要指出的是，最昂贵的解决办法并不一定就是最佳的办法。在市场竞争激烈的全球化经济的今天，这后一点不仅是必须考虑的，而且也是市场竞争的必然结果。

本书中所描写的许多技术技巧在改善信号的完整性方面也起着非常重要的作用。这些技术技巧的应用将大大降低设计过程中的迭代反复，改善产品在运行现场的可靠性，降低制造成本，以及降低最后产品的返修率和保修申诉，从而使产品具有强大竞争能力。更重要地是，它们还可以帮助公司大大降低在产品责任法规下可能承担的风险。

这里还应该指出的是，由于电子技术的迅猛发展和大量的新型电

子产品的不断涌现,许多新的电子技术和产品并无现成的 EMC 指令或标准可遵循。但即便是在这些情况下,本书所讨论的技术技巧仍然在提高产品质量和实践工程中有很高的价值,并且会给我们带来丰厚的经济效益。

我相信通过全书以及后续各册对有关 EMC 技术与应用的介绍和讨论,读者一定对电子/电气系统和产品的有关 EMC 的设计和技术知识的正确应用有一个初步的、较为全面的,又具有较高实用价值的认识和理解。若是这样,本书也就达到了对它所预期的目的。

我相信:如果您是一个刚刚从事 EMC 事业的初来者。那么,作为一个指导性或指南性的本书将会引导您沿着正确的设计途径来帮助完成您的产品;若您是一个经验丰富的 EMC 工作者,此书也可以为您提供许多有价值的参考;而您若是一个从事 EMC 教育或培训的专家,此书所讨论的内容以及与所附的大量插图更会使您的学生和培训对象在加深理解您所教授的内容上有着不可替代的作用。

由于本书使用了大量的英语缩略语,为了便于读者阅读和对这些缩略语的正确理解,在本书的最后以附录的形式,为读者编写了一个较为详细的“英文缩略语索引”。该索引包括了本书中所出现的所有英文缩略语。每条英文缩略语大致由下列几个部分组成:英文缩略语词头、所代表的英语全文、中文解释、定义描述、使用说明、简化电路和实物照片。

在此要感谢凯斯·阿姆斯壮先生允许将他的文章编译于此丛书。

由于电子技术和产品的迅速发展以及 EMC 技术的“黑色魔术”特征和学科的交叉性及边缘性,再加上本人水平有限,在本书的编译过程中难免会出现这样或那样的错误和不足,在此敬请专家、读者和广大 EMC 工作者不吝赐教与指正。

王守三
于美国康涅狄克州

目 录

序

概述 (项目 EMC 寿命周期)	1
第 1 章 电路设计和元器件选择	4
1.1 数字元器件和电路设计	4
1.1.1 元器件的选择	4
1.1.2 批次和掩模缩小问题	9
1.1.3 IC 插座是问题的根源之一	10
1.1.4 电路技术	10
1.1.5 扩展频谱时钟	13
1.2 模拟元器件和电路设计	15
1.2.1 模拟元器件的选择	15
1.2.2 防止解调问题	16
1.2.3 其他模拟电路技术	17
1.3 开关模式设计	20
1.3.1 IC 布局和器件选择	20
1.3.2 缓冲	22
1.3.3 散热器	23
1.3.4 整流器	23
1.3.5 有关磁性元件的问题和解决办法	24
1.3.6 用于开关模式的扩展频谱时钟	25
1.4 信号通信元件和电路设计	26
1.4.1 非金属通信为最佳选择	26
1.4.2 金属通信技术	27
1.4.3 光隔离	34
1.4.4 外部 I/O 保护	35
1.4.5 “不接地”和“浮地”通信	36
1.4.6 危险区域和内在安全通信	37
1.4.7 通信约定	38

1.5 无源元器件的选择	38
第2章 电缆和连接器	41
2.1 频谱的使用和骚扰的可能性	41
2.2 导体的漏电和天线效应	43
2.3 所有电缆都会受其内在的电阻、电容和电感的影响	45
2.4 避免导体的使用	46
2.5 电缆的分离和路由选择	48
2.6 如何获得电缆的最佳性能	50
2.6.1 传输线	50
2.6.2 选用产品内外导体时的 EMC 考虑	53
2.6.3 发送和返回信号的成对导体	54
2.6.4 从屏蔽电缆中获取其最佳性能——屏蔽	56
2.6.5 从屏蔽电缆中获取最佳性能——屏蔽的终止方法	58
2.6.6 在电缆两端都完成屏蔽的终止	60
2.7 如何获得连接器的最佳性能	61
2.7.1 非屏蔽连接器	61
2.7.2 PCB 之间的连接	61
2.7.3 屏蔽的连接器	62
第3章 滤波器和浪涌保护装置	65
3.1 滤波器的工作原理	66
3.2 软性铁氧体的优点	68
3.3 共模 (CM) 和差模 (DM)	69
3.4 选用滤波器的简单规则	72
3.5 电感量随电流的变化而改变	72
3.6 滤波器技术规范的规定	73
3.7 实践中的阻抗问题	75
3.8 大地漏电流和安全	77
3.9 有用信号的频率和敏感性问题	78
3.10 滤波器的接地	79
3.11 滤波器和屏蔽的最佳协调	81
3.12 滤波器的结构、安装和电缆的敷设	82
3.13 浪涌保护装置 (SPD)	83
3.13.1 SPD 的类型	83
3.13.2 数据线上是否需要 SPD	85

3.13.3 SPD 和数据完整性	85
3.13.4 SPD 的等级	86
3.13.5 SPD 和它们的熔丝	87
3.13.6 SPD 的装配	88
3.13.7 地电位提升问题	89
第 4 章 屏蔽	91
4.1 屏蔽和商业需要	91
4.2 屏蔽的一般概念	92
4.3 较大的和矩形的屏蔽罩性能较好	93
4.4 集肤效应	94
4.5 缝隙	95
4.6 低频 (磁场) 屏蔽	100
4.7 截止频率以下的波导技术	101
4.8 密封衬垫	103
4.9 显示器件 (和类似器件) 的屏蔽	107
4.10 通风装置缝隙的屏蔽	109
4.11 使用金属喷涂 (导电漆) 或电镀塑料进行屏蔽	110
4.12 非金属屏蔽	112
4.13 由于不恰当屏蔽造成的传导测试失败	112
4.14 屏蔽罩壳的安装	112
4.15 使用在 PCB 一级上的屏蔽	114
第 5 章 PCB 的设计和布局	118
5.1 简介	118
5.1.1 PCB 技术的协调使用和它们的性价比	118
5.1.2 有利可图的产品	119
5.1.3 先进的 PCB 技术	120
5.2 电路的隔离	120
5.2.1 外部世界与内部世界的边界	121
5.2.2 内部世界中的定界	121
5.2.3 内部区域的隔离	121
5.2.4 元器件的设置和印制线条的路由	123
5.3 接口抑制	125
5.3.1 外界/内部接口上的抑制	126
5.3.2 脏/高速/噪声和干净/敏感/安静区域之间的接口	126

5.3.3 接口抑制技术的有关细节	129
5.4 参考面	130
5.4.1 建立正确的参考面	131
5.4.2 0V 参考面与机柜的连接	135
5.4.3 参考面对屏蔽的影响	136
5.4.4 多个 PCB 装配中参考面的互连接	136
5.4.5 参考面分割问题	137
5.4.6 电气上隔离的参考面	139
5.4.7 若多层 PCB 花费过高该怎么办	140
5.5 电源的去耦合	141
5.5.1 电源去耦合技术	141
5.5.2 自谐振问题	142
5.5.3 没有电源参考面的去耦合	145
5.6 传输线	146
5.6.1 层次的变更	150
5.6.2 模拟和原型板 (PCB) 测试	152
5.6.3 带有传输线的 PCB 制造工艺问题	153
5.6.4 传输线的终止	153
5.6.5 多层 PCB 的层叠	156
5.6.6 连接、短线和缓冲器	157
5.6.7 背板系统中的隔离	159
第 6 章 静电放电、电压跌落、电压闪变和下降、机电开关和	
功率因数校正	161
6.1 静电放电 (ESD)	161
6.1.1 ESD 的种类	161
6.1.2 “人体模型”和 ESD 测试	162
6.1.3 防止人体 ESD 的设计技术	164
6.1.4 介质保护	164
6.1.5 屏蔽	167
6.1.6 增加信号线阻抗	170
6.1.7 瞬态电压抑制器 (TVS)	172
6.1.8 信号线的低通滤波	174
6.1.9 连接器的共模滤波	176
6.1.10 ESD 的电隔离技术	178

6.1.11 信号恶化的应对	179
6.2 电压的短暂跌落、下降、升高、消失、中断和停电	180
6.3 电压波动和闪变的发射	195
6.3.1 电源电感的影响	199
6.3.2 降低冲击电流	201
6.3.3 降低正常运行中的发射	202
6.3.4 降低波动 DC 负载的发射	204
6.3.5 系统一级上降低电压波动和闪变的技术	206
6.4 机电开关	206
6.4.1 开关、继电器和接触器上的拉弧和火花的抑制	207
6.4.2 抑制直流电动机的拉弧和火花	208
6.4.3 抑制电铃中的拉弧和火花	210
6.5 功率因数校正 (PFC)	211
6.5.1 电路一级上的 PFC 技术	213
6.5.2 系统一级上的 PFC 技术	221
英文缩略语索引	223
参考文献	313

概 述

(项目 EMC 寿命周期)

在向读者正式介绍本书具体内容之前，先让我们一起回顾一下一件新产品的的设计或一个新项目研发的理想 EMC 寿命周期，相信这对读者是有所帮助的。

在一个新项目的寿命周期中，EMC 问题可以概括如下几个方面。

1. 为一个新项目（产品）制定电磁技术规范

该技术规范包括：

(1) 该项目（产品）必须能够经受的电磁环境（包括连续的、高概率和低概率的骚扰事件）以及在骚扰事件期间所允许的性能下降程度。

(2) 该项目（产品）接近敏感装置的可能程度以及所允许产生的后果，以及由此所导出的发射指标。

(3) 该项目（产品）是否存在由于安全问题而对电磁性能指标提出附加的要求。安全性能的符合与否是由安全性指标所决定的，并非取决于 EMC 指标。

(4) 在满足所有需要满足的 EMC 标准的同时，还要制定针对特定产品的法规符合性文件，以及在实际应用中所需要的注意事项和“认证标准”（如考虑到市场的通用需求以及个别客户的特需指标等并不完全同等的因素）。

2. 系统设计

(1) 采用系统一级的最佳做法（即“自下而上”）。

(2) 按照自“整机” EMC 技术规范向下一直到各个系统的构成组件（即“从上到下”）。

3. 系统组件（电子）设计

(1) 采用电气/电子硬件设计最佳做法 (即“自下而上”, 详细内容将在本书的第 6 章中予以介绍)。

(2) 在研制硬件以前, 设计出模拟 EMC, 并在初期的样机 (板) 上执行简单的 EMC 测试。在形成第一个产品时, 就要尽可能地将 EMC 测试标准化。

4. 软件设计中采用最优化 EMC 技术

5. 要满足和符合所有针对市场要求的规范

6. 在质量评估 (QA) 中采用 EMC 技术

这样做的目的是控制:

(1) 装配中所有的变更, 包括布线走向以及元器件的替代。

(2) 所有电气/电子/机械设计的修改以及软件程序错误的纠正。

(3) 所有的变动因素。

7. 仅按照原始设计所设定的市场目标进行销售

为了开拓新市场, 要对初始的电磁规范进行重新审核。

8. 要对所有有关产品干扰问题的申诉进行调查

将任何能改进产品性能的结果都设计进目前的以及新产品中去 (这是产品寿命周期中, 改进产品性能的一个重要环节)。

以上所列各项可能会使有关工程技术人员“望而生畏”, 实际上, 这些都是成功的市场营销和工程师们已经知道, 并且已经在做的而已。所有这些只是意味着: 不要将他们的公司过分暴露在商业或违规的冒险之中。

正如电子技术变得越来越先进一样, 对管理和设计技术 (比如 EMC) 的要求也会变得越来越高。电子技术的棘轮效应是无法逃避的。假如一个公司想要保持它的效益和竞争能力, 在它的新产品中不断融入、更新电子技术是绝对必需的。事实上, 也正是大量新的电子技术正在开创着世界上最大的市场。其总价值已大大超过每年 1 万亿美元, 并且仍以每年 15% 左右的速度增长着。显然, 对那些敢于向前的奋进者, 高额回报也就在眼前。

本书所探讨的正是最佳 EMC 实践中的最重要的一些内容。我们将要讨论的是存在“什么”问题和“怎样”解决这些问题。而不是为

什么会出现这些问题和为什么需要使用这些技术或它们会起什么作用。当然，对一些最基本 EMC 理念的理解不仅可以大大帮助我们防止在工程设计中的考虑过多或考虑不周，而且可以帮助我们根据性价比选择最合理的解决方案。但要指出的是，对这些内容的更为详尽的探讨已超出本书所讨论的范围。

第 1 章 电路设计和元器件选择

从一个新产品的原始设计开始就采用良好的电路设计技术以及正确的选择各类有源和无源元器件，将会帮助我们以最佳性价比来满足产品的 EMC 要求。这样做不仅降低了成本，而且由于事实上降低了对滤波和屏蔽的要求，既减小了产品的尺寸，还减轻了产品的重量。

这些良好和正确电路设计技术的应用，不仅改善了数字信号的完整性和模拟信号的信噪比，而且还至少可以减少为了同一个目的所出现硬件和软件重复使用的可能。这将有助于我们通过使用它们来尽早地达到产品的性能指标的同时，也还为产品及早投放市场创造了条件。所以，掌握这些 EMC 设计技术和技巧，并将它们正确地应用到产品中去，应被视为是公司竞争优势的一部分，只有这样才会使公司获取最大利润成为可能。

1.1 数字元器件和电路设计

1.1.1 元器件的选择

大多数数字集成电路（IC）制造厂商都至少会生产一种称之为胶合逻辑^①的低发射系列产品。制造厂商也往往会生产几种不同型号的，对静电放电（ESD）具有较好抗扰能力的输入/输出（I/O）IC。有些厂商还为他们的客户提供一些“具有较好 EMC 性能的”（有些此类 EMC 微处理器的发射要比普通型号的低出 40dB）超大规模（VLSI）IC。

我们知道，大多数数字电路都是以方波作为时钟的。正如图 1-1 所示，它们恰恰都含有非常丰富的谐波成分。

① 胶合逻辑：一种简单的逻辑电路。常被用作处理器和其他器件的接口，从而形成可以执行更为复杂逻辑的电路或系统。——编译者注

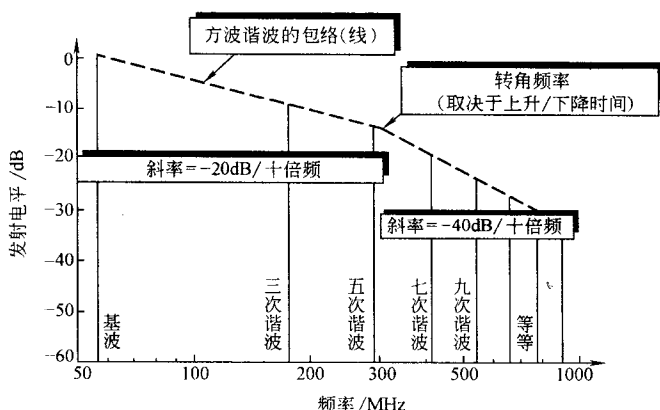


图 1-1 一个具有 1ns 上升和下降时间的理想方波的频谱

从图 1-1 可知，时钟频率越高，其边沿越陡峭，它的谐波频率及其发射电平也就越高。

因此，在满足产品技术指标要求的前提下，要选用最低的时钟频率，并尽可能地采用上升和下降沿较平缓的时钟器件。如果高速 CMOS (HC)[⊖] 可用的话，绝不选用先进 CMOS[⊖] (AC)。同样，当 CMOS 4000 可用的话，绝不选用 HC。

要选用具有高度信号完整性和 EMC 较好的 IC。下列是一些选择准则和这类元器件的一些实例。

(1) 选用电源和地参考插针安排得相邻近，并具有多个电源和地参考插针，以及把它们中心化的 IC 封装。

所有这些措施都将有助于形成电源和地电流通路之间的互感最大化，而又最小化了它们的自电感。从而减小了电源电流形成的电流环路区域，以使去耦合变得更为有效。所有这些安排都将会减少 EMC 的问题和地（电位）起伏。

(2) 降低输出电压波动以及控制转换速率。

降低输出电压波动以及控制转换速率可以降低信号的 dV/dt 和

⊖ CMOS: 互补型金属氧化物半导体器件; HC: 高速电路, 惯用 HC 指代先进 CMOS。——编译者注

⊖ AC: 先进电路, 惯用 AC 指代先进 CMOS。——编译者注

dI/dt ，从而可以将发射降低数个分贝。虽然这些技术改善了发射，但在某些情况下，它们有可能使抗扰性能变坏。所以在使用它们时，很可能需要采取某种折中方案，使两者都有所兼顾。

(3) 传输线的 I/O 匹配。

当高速信号必须沿着导体传送时，IC 需要具有与传输线相匹配的输出能力。举例来讲，可用的总线驱动器可以驱动一个 25Ω 的并联终端负载的话，那么它将可以驱动一个 25Ω 的传输线（例如随机存取记忆板 RAMBUS），或者驱动两个 50Ω 的传输线，或者 4 个 100Ω 的传输线，或者 6 个 150Ω 的传输线（当采用星形联结时）。

(4) 平衡信号。

平衡信号传输使用 $\pm$ （差分）信号，而不使用 0V 作为它的信号返回通路。这类 IC 在驱动高速信号（例如，时钟频率 $> 66\text{MHz}$ ）时是非常有用的。这是因为它们可以帮助保持信号的完整性。同时，也可以在某种程度上改善共模发射和抗扰性。

(5) 低地电位波动。

通常来讲，具有低地电位波动的 IC 的 EMC 性能也较好。

(6) 低发射电平。

正如前面已经指出的：大多数数字 IC 制造厂商都提供有低发射的胶合逻辑系列。例如，ACQ[⊙]和 ACTQ[⊙]系列与 AC 和 ACT[⊙]系列相比，前者具有较低的发射。有些厂商还提供 EMC 性能较好的 VL-SI 系列。例如 Philip 公司至少生产有两种 EMC 类型的 80C51 微处理器（CPU），它们要比其他类型的 80C51 产品降噪 40dB。

(7) 推荐使用非饱和逻辑。

这是因为它们的上升和下降沿时间倾向于平滑（受控转换速率）。因此，与像 TTL 这类饱和和逻辑相比，它们的高次谐波电平也就相对较低。

(8) 对静电放电（ESD）和其他骚扰现象具有高等级抗扰性能的

⊙ ACQ：具有“安静”输出的先进 CMOS。——编译者注

⊙ ACTQ：具有 TTL 输入和“安静”输出的 CMOS，TTL 为晶体管—晶体管逻辑。——编译者注

⊙ ACT：具有 TTL 输入的先进 CMOS。——编译者注