



PCB 电磁兼容技术

—设计实践

顾海洲 马双武 著

清华大学出版社

PCB 电磁兼容技术

——设计实践

顾海洲 马双武 著

清华大学出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

PCB电磁兼容技术——设计实践/顾海洲,马双武著. —北京:清华大学出版社,2004

ISBN 7-302-08431-9

I. P… II. ①顾… ②马… 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 028014 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 田志明

版式设计: 肖 米

印 装 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 148×210 **印 张:** 7.75 **字 数:** 216 千字

版 次: 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08431-9/TN·184

印 数: 1~3000

定 价: 22.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或 (010)62795704

内 容 简 介

本书从工程实践的角度研究分析了要实现电子产品电磁兼容需要在 PCB 设计阶段解决的一些问题。全书共分 9 个章节。第 1 章简要介绍电磁兼容标准和 PCB 设计基础知识;第 2 章介绍了在数字电路设计时需要的旁路、去耦和储能等设计措施;第 3 章介绍了走线特性阻抗及传输线端接技术;第 4 章介绍了数字单板中特殊的信号线——时钟设计;第 5 章介绍了单板上电源的设计问题;第 6 章介绍了接地技术及 PCB 上实现的接地问题;第 7 章介绍了在 PCB 单板上实现的静电防护设计;第 8 章介绍了 PCB 上的孔、连接器的设计问题;第 9 章介绍了设计大面积单板如背板、底板等的特殊设计要点。在介绍设计知识和要点的同时,作者将真实产品中出现的典型问题整理成案例,分别放在相应的章节里,他山之石,供读者借鉴。附录部分,介绍了一些整机产品解决电磁兼容试验项目的思路 and 对策,并且将 PCB 设计中的一些常见问题评审要素,以评审大纲的形式提供给读者,供硬件设计、PCB 设计和质量保证人员自查、设计评审时使用。

本书集实践和理论于一体,概括了数字电路印制电路板电磁兼容性设计的重点,适合那些涉及系统设计、逻辑设计、硬件设计、PCB 布局的工程技术人员,同时适合测试工程师和技师,从事机电产品、加工、制造和兼容调试工作的人员,电磁兼容设计工程师,以及负责对硬件工程设计进行管理和质量控制的人员阅读参考。

序

作者长期负责电子产品的可靠性工作,经常与硬件研发人员和网上的一些朋友交流电磁兼容设计方面的经验和教训。在这一过程中,作者经常碰到一些常规的但设计人员却一犯再犯的错误,其中有些虽然是小错误,可这些小错误不但延缓了项目的进度,也浪费了宝贵的资源,这是十分可惜的。对于电磁兼容问题,由于国内起步较晚,同时也由于相关试验设备比较昂贵,缺少试验分析平台,因此不少人将之看成是一个黑盒子,觉得它比较神秘。对于那些应该在 PCB 设计阶段解决的电磁兼容问题,不少设计人员在 PCB 设计时却不予考虑,总是等产品设计完成后再拿样机到试验室做试验,看结果能否满足相关标准要求。可惜的是,这样的试验结果一般都不会太理想。

作者在负责电子产品的电磁兼容设计和电磁兼容试验的过程中,每当看到有些产品通不过标准测试时,总喜欢拿 PCB 过来分析一下,因此常可以看到一些其实是非常小的电磁兼容设计细节问题而造成产品通不过试验的案例,如果设计时遵循相应的电磁兼容规则,就不会导致产品电磁兼容试验通不过了。每当碰到这种情况,就忍不住有一种将这些问题写出来的冲动。经过一段时间的收集和积累,整理后就成了这本书。回顾这些年来的工作经历,在电磁兼容设计过程中,作者也曾经历过不少的失误和失败,可以说,现在作者拥有的知识和经验不少就是建立在这些失误和失败上的。

由于本书侧重于 PCB 的电磁兼容工程设计,作者将尽量避免那些纯理论的讲述,而是采用了一些实例插图和少量易懂好用的公式,将高深难懂、许多人认为是黑盒子的电磁兼容技术在 PCB 设计阶段的应用细致地进行了讲解,作者希望这样的处理能够为感

感兴趣的读者提供一本简明实用的 PCB 电磁兼容设计手册。

基于同样的理由,本书也没有对相关电磁兼容标准、试验项目做详细讲解,这些内容都可以从相关网站上免费获得。本书的附录也是读者所应该关注的,作者将电子产品难以通过的电磁兼容试验项目解决思路和 PCB 电磁兼容设计评审大纲这两个浓缩的精华作为附录内容,这是产品设计人员不可不看的内容,不是附在后面凑字数的。至于附录部分的分贝概念和一些常见的名词术语,则属于可看可不看的内容,这两部分内容是为本书的完整性考虑而加上的。

由于编者水平有限,也由于电磁兼容问题的复杂性,书中难免存在不妥甚至错误之处,敬请读者予以指正和帮助。

本书是集体劳动的结晶,是合作的成果,在编写过程中同时得到了许多人的帮助和指导,在此深表感谢。特别感谢中兴通讯股份有限公司移动事业部主管质量工作的侯利副总经理和质量部林国勇部长、姜雷等领导。本书在编写过程中得到了他们的大力指导和支持,他们对本书的许多内容提出了许多宝贵的建设性意见和建议,使得本书顺利付梓。

衷心感谢长期给予我们友好帮助的朋友们。

顾海洲 马双武
2004 年 1 月

绪 言

电磁兼容的重要性

现代电子产品的一个主要特征是数字化,高速微处理器的应用十分普遍,这些数字电路在工作时,会产生很强的电磁干扰发射,这不仅有可能使产品不能通过有关的电磁兼容性标准测试,甚至可能连自身的稳定性也不能保证。在产品的研发过程中,由于产品可靠性水平不高、工作不稳定而浪费大量的时间进行调试,甚至失去市场时机而造成重大损失的事例时有发生。目前电子产品的密集度已经成为衡量现代化程度的一个重要指标,大量的电子设备在同一个空间同时工作,电磁干扰的问题呈现出前所未有的重要性。

电磁兼容问题越来越成为电子设备系统中的一个严重问题,电磁兼容技术成为许多技术人员重视的内容,世界上各国都对电子产品的电磁兼容性做强制性限制。产品只有通过电磁兼容性测试才能销售、进网,这已经成为西方国家限制电子产品进口的一道坚固的技术壁垒。我国许多企业已经认识到,与关税壁垒相比,这种技术壁垒对我国电子产品的障碍更大。我国已经出台有相应的法规对产品进行电磁兼容性强制检测并要求通过,否则不得进入市场。在此之前,一些产品在电磁兼容性方面已经受到严格管制,如军用产品、火灾报警产品、智能化电表等对电磁兼容问题比较敏感的产品。电磁兼容将成为电子产品走向市场必须逾越的鸿沟。

不管是哪类工程人员,一个工程项目设计组在进行设计时,不能只考虑产品可以在合适的时间内制造出来就行了,还要考虑在设计、测试、集成安装以及生产过程中费用应该最小。最常见的问题是,项目组过分强调功能性能方面的市场需要,而忽视了对产品

EMC 标准的法律性要求以及产品的安全要求,如果产品经不起 EMC 标准的检测,就必须进行改进或重新设计。这种改进和重新设计过程极大延长了产品上市时间,也增加了费用,这些费用开销不仅包括增加投入工程设计的人力,还包括新印制电路板的布局与工艺、新样品的制作材料、系统集成组装测试、为尽快出新产品而购买的元器件、测试仪器以及相关的准备工作。重新设计的代价还可能包括产品市场份额的减少、产品供货周期加长、消费者对公司的满意度下降等。

电磁兼容性是一门实践性很强的技术,决不是通过阅读一些理论教科书就可以解决问题的。有的人尽管花费了大量时间阅读了许多电磁兼容性理论方面的书籍,但是却发现在工作中仍然难以将理论应用到实践中,不能解决即使是最简单的电磁兼容问题。目前有些人简单地将电磁兼容理解为接地、屏蔽、滤波,当碰到产品电磁兼容试验通不过时就认为,只要将设备地接好了,将金属外壳进行屏蔽了,就可以解决电磁兼容问题了。作者曾经碰到一个通信产品的设计负责人,当电磁兼容测试人员告诉他试验不通过、有问题时,他第一个反应是怀疑试验室系统的接地有问题,后来又怀疑测量仪器有问题,结果不管地怎么接,试验还是通不过。后来想改进,在电源线上加滤波器时,却找不到合适的地方,也无法保证滤波前后的电源线不进行交叉,因为产品系统设计时就没有考虑这些问题,导致后面的改进十分被动。如果产品在系统设计、详细设计时不考虑电磁兼容性设计,或者对电磁兼容性考虑得较少,则在最后需要通过电磁兼容性测试时,一般需要单独“处理”。最终结果虽然有可能是通过了测试,但是这些单独“处理”的措施可操作性很差,或者根本就没有办法进行生产,因此通过电磁兼容测试的可能只是样机,真正销售的产品跟通过测试的产品存在着较大差异。

掌握电磁兼容设计技术,使产品具有良好的电磁兼容性,已经成为电子产品设计人员所面临的重大挑战,因为衡量一个产品的好坏的重要标准之一就是看其市场情况。产品性能稳定可靠、满足要求、有竞争力,当然就会有市场——其实做产品就是这么简单。电磁兼容性设计应该从产品设计初期,在方案阶段就要考虑电磁兼容性的需求,在详细设计阶段要合理进行电磁兼容性设计。电磁兼容性设计不但要考虑系

统、更要对单板、结构、工艺等方面加以考虑,甚至要考虑到每一个螺钉,只有这样,才能真正解决电磁兼容性问题,保证电子产品的稳定可靠。

PCB 电磁兼容设计的重要性

无论简单的电话机、电视机,还是复杂的通信电子产品,都是由外壳将 PCB 通过某种组装方式进行组装,通过相应的接口线(天线、不同频率的信号线、电源等)组成的完整设备。电子产品需要通过电磁兼容测试,才可进入市场。产品设计时只有在产品方案阶段、详细设计阶段对电磁兼容性问题进行考虑,才能真正保证产品的电磁兼容性能。如果等产品生产出来之后不能通过电磁兼容性标准的测试,导致产品不能销售出去时,才开始考虑解决电磁兼容性问题,才开始寻求高效解决措施,为时已晚。

企业追求利润最大化的今天,在考虑制造成本的今天,人们不可能等到产品设计后期,到产品设计生产出来以后,再通过工艺结构上打补丁,通过增加额外的器件来解决电磁兼容性问题。因此,支持并建议以很小的花费就能设计出技术含量高的产品。在 PCB 设计时应严格执行技术方案。这样才可以节省开支,提高产品性能和可靠性。应尽可能实现第一次出厂就可以满足发射和抗扰度要求,使产品性能达到满意的效果。

其实,产品要通过电磁兼容测试并不难,设计所花费的代价也不很大,还能保证产品稳定可靠工作。只要设计工程师在 PCB 设计和系统设计方面充分考虑电磁兼容设计,产品通过电磁兼容测试就是可行的,否则全世界的电磁兼容标准就不会这么定。试想一下,现在还可能出现一个谁都无法实现的标准吗?那么标准还有什么存在的意义?

俗话说“巧妇难为无米之炊”,PCB 是产品组成的基础。如果将设计一个产品比喻成写一篇文章,则系统设计就是文章的架构,PCB 就是文章的词汇,词汇不好,文章怎么能吸引人?

本书的关注点限定在单板 PCB 方面。对于像工艺结构部分的电磁兼容性设计,如外壳防护、屏蔽设计方法、一次供电电源的设计等,不

作讨论;对于系统级的电磁兼容设计,如接地、屏蔽、搭接、滤波等,这方面的参考书很多,因此本书也不将这些作为重点,没有展开讲述。

本书没有介绍一般电子产品电磁兼容的试验项目,对电磁兼容性标准也只是作为简单介绍。电磁兼容标准有基础标准、通用标准和产品标准之分,不同的产品需要选用相应的标准,比如手机产品,和医疗器械产品,其标准就有很大的区别;电力系统产品和通信产品也是不同的要求,通信产品中交换、传输产品与移动基站产品也是有区别的。再者,电磁兼容性标准及试验项目要求都是开放的,都可以通过相关机构的网站下载或购买。因此,建议对标准有需求的读者,直接到相关网站去下载或到相关机构去购买,通过这些渠道,可以得到标准的最新版本。

本书的目的

本书希望揭开 PCB 设计阶段电磁兼容技术的神秘面纱,使它不再神秘。根据作者多年从事可靠性、电磁兼容设计的经验和对产品试验中问题的整理,本书对 PCB 设计阶段应该掌握的设计,包括一些常识和规则(如传输线知识、PCB 分层、过孔、连接器设计、电源、地平面处理、背板设计处理、时钟及敏感信号线的处理等)进行了总结,并且依据相应的设计规则和规范进行了升华。硬件设计人员、PCB 设计人员只要遵照这些规则进行 PCB 设计,就可以解决应该在 PCB 阶段解决的电磁兼容性问题。

本书的目的只是解决 PCB 上的 EMC 问题,因此,对能够且应该在 PCB 设计阶段解决的 EMC 问题进行了讲述。由于 EMC 理论的高深性,本书力求通过通俗易懂的讲述和实际的案例为感兴趣的读者提供参考和借鉴,尽量避免使用公式推导和数学分析讲述问题。

本书适合以下人员

- ✓ 硬件工程师;
- ✓ PCB 设计工程师;
- ✓ 想在 PCB 阶段解决 EMC 问题的工程师或电磁兼容测试工

程师；

- ✓ 负责硬件产品开发的项目经理等管理人员；
- ✓ 负责机电产品加工、制造、调测的工程师；
- ✓ 电磁兼容顾问及负责对硬件工程设计进行过程监控、质量评估的工程师；
- ✓ 大专院校电子、计算机、电磁兼容专业的学生。

本书假设

- ✓ 你做硬件设计,需要与电路打交道。
- ✓ 你做 PCB 设计,需要与 PCB 打交道。
- ✓ 你负责硬件测试,需要与单板打交道。
- ✓ 你是硬件项目经理,管理人员,但需要知道硬件开发中会面临的问题和风险,需要知道硬件开发的进度。
- ✓ 你是负责产品 EMC 测试的工程师,想要从根本上帮助产品解决 EMC 问题。
- ✓ 你是硬件项目产品的负责人,知道产品有电磁兼容性需求,需要通过电磁兼容性测试。
- ✓ 你是产品或某公司 EMC 顾问,需要帮助公司解决产品 EMC 问题。
- ✓ 你是学电子、计算机、自动控制、电磁兼容的在校学生,将来需要面对产品的稳定性、可靠性问题,需要解决一些电磁兼容性问题。
- ✓ 你是立志于专职从事电磁兼容工作的,需要与电磁兼容技术打交道。

你可以从这本书得到有用的东西,本书将告诉你如何在第一时间解决产品电磁兼容问题。

申明

本书的大部分案例取材于作者多年工作实践,是真实的产品电磁

兼容问题和改进办法,它们被放到相应的章节里,供读者参考。

电磁兼容设计技术是众所周知的技术,只不过许多设计工程师没有重点关注。好的设计经验是财富,应该大家共享,作者自己也是这么学来的,因而深有体验。所以,作者系统地将其整理并且集成本书,与大家共享。

目 录

序	I
绪言	III
第 1 章 电磁兼容和 PCB 设计	1
1.1 电磁兼容性标准	1
1.1.1 电磁兼容性标准发展简介	1
1.1.2 世界各国的 EMC 标准	4
1.2 硬件开发简介	8
1.2.1 原理图设计	8
1.2.2 PCB	9
1.2.3 原理图、PCB 设计工具	10
1.3 电磁兼容和 PCB	13
1.3.1 单板自身导致电磁兼容	13
1.3.2 外界因素	15
1.3.3 电磁兼容的要素	17
1.4 PCB 设计	18
1.4.1 准备工作	18
1.4.2 布局	19
案例 1.1: PCB 布局不好影响 DSP 芯片工作	21
1.4.3 分层	23
1.4.4 布线	25
第 2 章 旁路、去耦和储能	27
2.1 电容	29

2.1.1	额定电压	29
2.1.2	绝缘电阻及漏电流	30
2.1.3	损耗因素	30
2.1.4	温度系数	30
2.1.5	谐振频率	31
2.1.6	电容选择的要点	32
2.2	PCB 板上电容的应用	34
2.2.1	旁路电容	34
2.2.2	去耦电容	35
2.2.3	储能电容	37
第 3 章	单板传输线设计	39
3.1	阻抗和特性阻抗	40
3.1.1	阻抗	40
3.1.2	特性阻抗	41
3.2	传输线	42
3.2.1	PCB 传输线结构	42
3.2.2	反射	43
3.2.3	消除反射的端接方案	47
3.2.4	串扰	56
	案例 3.1: 某产品时钟板的设计	62
第 4 章	单板时钟部分的设计	65
4.1	基本原理	67
4.2	PCB 设计不当导致时钟问题	67
4.2.1	时序	68
4.2.2	时钟偏移	68
4.2.3	振铃	69
4.2.4	非线性边沿	70
4.2.5	上冲/下冲	71

4.2.6	时钟源的电源滤波	71
4.2.7	时钟驱动电路 EMI 问题	73
4.3	时钟系统的 EMC 设计	74
4.3.1	布局	74
4.3.2	共用时钟走线	76
4.3.3	时钟传输线要求及 PCB 分层	76
4.3.4	其他控制	78
	案例 4.1: 某系统时钟板 ESD 试验问题	78
第 5 章	单板电源部分设计	81
5.1	供电系统介绍	81
5.1.1	集中式供电	81
5.1.2	分布式供电	82
5.2	分布式供电系统电性能设计	84
5.2.1	确定输出电压	84
5.2.2	确定输出电流	85
5.2.3	模块并联	85
5.3	电源导致的信号非理想回路	85
5.3.1	信号的参考平面为电源层	86
5.3.2	信号跨越电源平面上的沟槽	87
5.3.3	避免非理想回路	87
5.4	电源保护	88
5.4.1	过流保护	88
5.4.2	欠压告警	89
5.4.3	缓启动	90
5.4.4	过压保护	90
5.5	滤波	95
5.5.1	设计要求	95
5.5.2	阻抗失配	96
5.5.3	滤波原理	97

5.5.4	元件参数选择	97
5.5.5	PCB 设计	99
	案例 5.1: 模块电源 CASE 脚接地问题	99
第 6 章	接地设计	103
6.1	系统接地设计	104
6.1.1	联合接地的概念	104
6.1.2	接地的分类情况	105
6.1.3	地的简单分类	106
6.1.4	接地的方法	109
6.1.5	系统接地的要求	112
	案例 6.1: 接地不规范导致基站不工作	115
6.2	PCB 接地设计	116
6.2.1	PCB 的接地设计原则	116
6.2.2	PCB 布局处理	118
6.2.3	PCB 分层设计	119
6.2.4	PCB 地层分割处理	123
	案例 6.2: 某一 PCB 不合理的分层、分区	127
	案例 6.3: PCB 上的不合适的地层分割	130
6.2.5	PCB 上一些关键器件的接地设计	132
6.3	射频印制版的接地设计	134
6.3.1	射频设备的搭接要求	134
6.3.2	射频设备接地要求	135
6.4	I/O 接口设计处理	135
6.4.1	差分电路	136
6.4.2	隔离变压器	136
6.4.3	共模电感	136
	案例 6.4: E1 接口的滤波问题	137
6.4.4	光电耦合器	139
6.5	相关电缆的接地设计	139

6.5.1	双绞线·····	139
6.5.2	同轴电缆·····	140
6.5.3	带状电缆·····	141
6.5.4	信号电缆线屏蔽层的接地·····	142
第7章	静电防护设计·····	145
7.1	静电放电对元器件的危害·····	146
7.1.1	直接故障·····	147
7.1.2	潜在故障·····	148
7.2	人体带电模型(HBM)·····	149
7.2.1	ESD对器件的损伤·····	150
7.2.2	ESD对系统产品的影响·····	150
7.3	PCB的静电防护设计·····	151
7.3.1	器件的选择·····	151
7.3.2	工艺结构方面PCB抗ESD设计·····	152
	案例7.1: PCB工艺结构影响ESD测试·····	154
	案例7.2: PCB上复位键外壳接地·····	157
	案例7.3: 地层平面上的“孤岛”地·····	161
7.4	静电手环的使用·····	164
第8章	单板上孔、连接器的设计·····	167
8.1	孔的设计·····	167
8.1.1	孔的机械属性·····	168
8.1.2	过孔电容·····	170
8.1.3	过孔电感·····	170
8.1.4	回流与过孔的关系·····	171
8.2	连接器·····	172
8.2.1	互感·····	173
8.2.2	串联感应——如何产生EMI (电磁干扰)·····	176
8.2.3	引脚电容·····	178