

本书详细介绍了电磁兼容（EMC）的“分层与综合设计法”，对电子、电气产品如何做好电磁兼容设计进行了较全面的论述。前三章介绍了与电磁兼容设计有关的国际组织和相关标准、自然骚扰源与人为骚扰源、骚扰耦合途径等概念。在此基础上，论述了有源器件的选型与印制电路板的设计以及接地设计，从产品设计的源头根本解决 EMC 问题的方法。然后，在产品设计的各个阶段，进行屏蔽、滤波、抗扰等综合设计。书内还详细论述了电源完整性、信号完整性、系统时序管理和眼图、谐波抑制与功率因数校正、瞬态骚扰抑制器等重要理论与方法，并在每章的最后安排了完整的电磁兼容设计实例供读者参考。全书理论密切联系实际，突出实践特色。本书适合电磁兼容科技人员阅读参考，也可供电磁兼容研究领域的本科生和研究生用作辅助教材。

图书在版编目（CIP）数据

电磁兼容设计实践/白同云编著. —北京：中国电力出版社，
2007

（电磁兼容应用技术丛书）

ISBN 978-7-5083-5403-3

I. 电… II. 白… III. 电磁兼容性—设计 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 045129 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月北京第一次印刷

1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 20.5 印张 461 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

Preface

前 言

随着科学技术的发展,大量技术含量高、内部结构复杂的电子、电气产品得到了广泛的应用。同时,芯片的速率和集成度也愈来愈高,高密度电子组装技术进一步广泛采用,电子、电气产品正向“轻、薄、短、小”和高功能化发展,由此而产生的电磁骚扰日益严重。因此,保护电磁环境、防止电磁污染,正在引起我国政府和世界各国以及相关国际组织的普遍关注。前几年,国际上提出了可持续发展的概念,把环境问题与经济发展有机地结合起来,并且提高到发展战略的高度来认识,引起了广泛的重视,已构成世界经济和国际贸易发展的大趋势。电子、电气产品电磁兼容性指标合格与否,便成为市场准入或市场流通的必要条件。我国正在顺应国际上这一发展趋势,加紧完善与国际接轨的电磁兼容认证制度。从2003年8月1日开始,我国对属于《第一批实施电磁兼容安全认证的产品目录》内的产品,凡没有通过3C认证的,则不得出厂销售、进口或在经营性活动中使用。这个强制认证目录还会不断地增加,最终达到所有的电子、电气产品都需要进行强制认证。

我国既是电子、电气产品的生产大国,也是电子、电气产品的销售大国,而且进口的电子、电气产品还占一定的比例。认真做好电子、电气产品的电磁兼容设计和电磁兼容认证工作既是提高我国产品在国际市场竞争能力的保证,也是维护我国合法权益,抵制劣质产品进口的需要。

在复杂的电磁环境中,每个电子、电气产品除了本身能抵抗外来电磁骚扰,正常工作以外,还不能骚扰其他电子、电气产品或电磁骚扰超过标准规定的限值,这就是电子、电气产品电磁兼容设计需要解决的问题。经验证明,在电子、电气产品设计的初始阶段,同时进行电磁兼容设计,可以把电磁兼容问题的大部分解决在设计定型之前,而且成本增加不会太大。如果等到生产阶段再去解决这些问题,非但在技术上将带来很大难度,而且还会造成人力、物力、财力和时间的极大浪费。

电磁兼容设计是一门以电磁场理论为基础,包括信息、电工、电子、通信、材料、结构等学科的边缘科学,同时也是一门实践性比较强的学科。电磁兼容设计需要建立一套规范的设计体系。目前,一些比较成功的企业,通常都采用一种系统的电磁兼容设计流程,即本书作者提出的“分层与综合设计法”,从产品设计的源头根本解决EMC问题,在研发流程中融入EMC设计理念,在产品设计的各个阶段进行EMC综合设计,把可能出现的EMC问题放在研发前期进行考虑。从而确保产品样品出来后,能够一次性通过EMC试验与认证,同时也缩短了产品的面市周期。

电磁兼容设计是一项艰巨的工作,需要我们付出不懈的努力,而且要舍得投入。面对国际电磁兼容领域的最新发展,以及电磁兼容性对国内、国际贸易所产生的影响,

我们应该有紧迫感和强烈的责任感。

本书是作者在清华大学工程物理系授课并为中国科学院电子学研究所、光电研究所、空间中心和中国运载火箭技术研究院、总参第 57 研究所、西北核技术研究所、联想研究院等单位所作专题报告，以及参加大型集装箱检查系统等科研工作的基础上编写而成。本书的撰写是在清华大学工程物理系以及核电子学研究室领导和同志们的关心与帮助下进行的，他们给予作者许多热情的鼓励与支持，特表示衷心的感谢！

本书共分十一章。第一章至第三章介绍了与电磁兼容设计有关的概念，第四章至第十一章详细介绍了“分层与综合设计法”。全书理论密切联系实际，突出实践特色对电子、电气产品如何做好电磁兼容设计进行了较全面的论述，期望对广大读者有一定帮助，若有不当之处，敬请批评指正。

白同云

于清华大学工程物理系

Contents

目 录

前言		八、跨国电气电子工程师学会 EMC 专业委员会 (IEEE-EMC)	18
第一章 绪论	1	第二节 频谱分配与管理	18
第一节 电磁骚扰及其危害	1	第三节 EMC 标准与规范	19
第二节 电磁兼容	5	一、CISPR 的 EMC 标准	20
第三节 电磁兼容设计	7	二、IEC 的 EMC 标准	21
一、系统间电磁骚扰控制技术	8	三、欧洲的 EMC 标准	26
二、系统内电磁兼容控制技术	8	四、EMC 标准体系	36
第四节 电磁兼容设计的内容和方法	8	五、EMC 标准分类	36
第五节 电磁兼容性管理	9	六、我国的标准化组织	37
一、论证阶段	9	七、我国的 EMC 标准及部分 军用标准	38
二、方案阶段	9	第四节 欧盟电磁兼容指令	47
三、工程研制阶段	10	一、指令概况	47
四、定型阶段	10	二、电磁兼容指令 89/336/EEC	47
五、生产和使用阶段	11	三、2004 年 12 月 5 日颁布的 EMC 新指令	48
第二章 实现电磁兼容的组织措施	12	第五节 我国的强制性产品认证 制度	49
第一节 国际组织与合作	12	第三章 电磁骚扰源与耦合途径	51
一、国际电信联盟 (ITU)	13	第一节 电磁环境	51
二、国际电工技术委员会 (IEC)	13	第二节 电磁骚扰特性	52
三、国际无线电干扰特别委员会 (IEC/CISPR)	13	一、规定带宽条件下的发射电平	52
四、IEC 第 77 技术委员会 (IEC/TC 77)	16	二、频谱宽度	52
五、欧洲电工标准化委员会 (CENELEC)	17	三、波形	52
六、国际频率登记委员会 (IFRB)	17	四、出现率	52
七、国际无线电科学联盟 (URSI)	17	五、辐射骚扰的极化特性	52
		六、辐射骚扰的方向特性	53

七、天线有效面积	53	四、例：高速 PCB 电源完整性 仿真	90
第三节 电磁骚扰的分类	53	五、例：利用 PowerIntegrity 模块， 分 析电源分配网络输入阻抗 ...	92
第四节 自然骚扰源	53	第五章 PCB 设计与信号完整性 研究	95
一、电子噪声源	53	第一节 PCB 的分类	95
二、天电噪声	54	一、单面板 (Single-Sided Boards)	95
三、地球外噪声	54	二、双面板 (Double-Sided Boards)	95
四、沉积静电等其他自然噪声 ...	54	三、多层板 (Multi-Layer Boards)	96
第五节 人为骚扰源	54	四、刚性 PCB (Rigid PCB)	97
一、连续波骚扰源	54	五、普通多层板	97
二、瞬态骚扰源	55	六、激光钻孔多层板	97
三、非线性现象	56	七、柔性 PCB (Flex PCB FPC)	97
第六节 综合电磁环境	56	八、积层多层板 (Build-up Multilayer BUM)	97
第七节 传导耦合	57	九、PCB 制造技术的发展趋势 ...	98
第八节 共阻抗耦合	57	第二节 PCB 布线与电磁兼容	99
第九节 感应耦合	59	一、PCB 走线的阻抗与布线基本 原则	99
一、电感应 (容性) 耦合	60	二、PCB 布局的基本原则	100
二、磁感应 (感性) 耦合	61	三、RF 产品设计的 PCB 布线 ...	101
第十节 辐射耦合	62	四、PCB 设计的静电放电 (ESD) 抑止准则	102
第四章 有源器件的选型和电源完整性 研究	64	第三节 电子系统设计面临挑战	103
第一节 有源器件敏感度特性与发射 特性	64	第四节 信号完整性分析	105
一、电磁敏感度特性	64	一、传输线	105
二、电磁骚扰发射特性	67	二、高速 PCB 信号完整性设计 方法	114
三、 ΔI 噪声电流和瞬态负载电流是 电磁骚扰的初始源	70	第五节 高速 PCB 设计的仿真	115
第二节 掌握 IC 设计和封装特性以 抑制 EMI	76	第六节 PCB 设计规范	121
一、掌握 IC 封装特性以达到最佳抑 制 性能	76	一、布局	122
二、集成电路封装技术的发展	78		
第三节 高速印制电路板电源完整性 研究	82		
一、电源/地阻抗分析	83		
二、电源分配网络设计	86		
三、SIWAVE 电源完整性解决 方案	90		

二、LAYOUT 的基本要求及规则： 环路面积为零	123	五、大系统接地	163
三、布线	124	第二节 地线阻抗	163
四、PCB 原材料	126	第三节 地环路问题	164
五、PCB 制作工艺和设计能力	126	第四节 屏蔽电缆的接地	166
第七节 设计举例：高速电信交换子 系统带来 PCB 设计的挑战	126	一、屏蔽层接地产生的电场屏蔽	166
第六章 系统时序管理	130	二、屏蔽层接地产生的磁场屏蔽	167
第一节 时钟缓冲器	130	第五节 设计举例：电气系统的 接地	168
第二节 时序预算	132	第八章 屏蔽设计	170
第三节 时钟抖动	134	第一节 屏蔽理论	170
一、确定型抖动 (Deterministic Jitter)	134	一、近场、远场和波阻抗的概念	170
二、随机抖动 (RMS Jitter) ...	135	二、屏蔽效能的概念	171
第四节 抖动测量	136	第二节 屏蔽材料	173
一、BER 测试仪	136	第三节 屏蔽完整性保障措施	175
二、抖动分析仪	137	一、缝隙的屏蔽	175
三、示波器	137	二、孔洞的屏蔽	180
四、混合仪器	138	三、孔缝屏蔽特殊材料	184
第五节 眼图 (eye pattern)	138	第四节 用滤波器连接器消除电缆穿越 屏蔽壳体时的辐射	185
第六节 普通时序系统 (共同时钟 系统)	144	一、导线或电缆的天线效应	186
一、时序参数的确定	145	二、电缆屏蔽层的类型	187
二、时序约束条件	148	三、滤波器连接器	188
第七节 源同步时序系统	150	四、馈通滤波器 (穿心电容)	190
一、源同步系统的基本结构	150	五、铁氧体磁环	190
二、源同步时序要求	151	第五节 设计举例：抑制电缆骚扰的 制胜武器——滤波连接器	190
第八节 设计举例：高速 PCB 设计 中的时序分析及仿真策略	153	一、电缆是系统的薄弱环节	190
第七章 地线设计	158	二、使用滤波器连接器的注意事项	191
第一节 接地系统	159	第九章 电磁骚扰滤波器设计与 安装	193
一、悬浮地	159	第一节 电磁骚扰滤波器的网络 结构	194
二、单点接地	160		
三、多点接地	161		
四、混合接地	162		

第二节 反射式低通滤波器设计	196	第六节 设计举例：如何选择和使用 电源	246
第三节 插入损耗与频率特性	198	第十一章 抗扰设计	249
第四节 电源滤波器	198	第一节 电快速瞬变脉冲群试验	249
第五节 滤波器的安装	199	一、对 EFT 的说明	251
第六节 吸收式低通滤波器	200	二、受试设备不能通过 EFT 试验的 原因	252
一、铁氧体的应用	201	三、抑制 EFT 的方法	255
二、复磁导率与阻抗	202	第二节 雷击浪涌	255
三、铁氧体材料的选择	204	一、全球雷击的一些数字	255
四、铁氧体心尺寸的选择	204	二、雷害形式——直击雷、感应雷 和浪涌	256
五、阻抗和插入衰减的关系	205	三、雷击与瞬变脉冲电压	258
六、环境	205	四、IEC 61000—4—5 (GB/T 17626.5) 雷击浪涌的抗扰度试验	267
七、新材料	205	第三节 静电放电产生的电磁骚扰	268
八、铁氧体 EMI 抑制组件的应用	210	一、ESD 对电子设备的影响	269
第七节 设计举例：PLC 控制系统的 抗骚扰研究	213	二、减小 ESD 影响的设计导则	270
第十章 谐波抑制与功率因数校正	218	三、附加保护措施	270
第一节 谐波的基本概念	218	四、设计和制造中的防静电措施	271
第二节 无功功率和功率因数	219	五、IEC 61000—4—2 (GB/T 17626.2) 静电放电抗扰试验	276
第三节 无功功率的影响和谐波的 危害	223	六、电子产品的静电放电防护 设计	277
一、对供电线路的危害	224	第四节 瞬变骚扰抑制器	278
二、对电力设备的危害	224	一、避雷管	278
三、对用电设备的危害	225	二、压敏电阻	281
四、谐波对人体的影响	225	三、硅瞬变电压吸收二极管	284
第四节 电力电子装置功率因数和谐波 分析	225	第五节 电路保护元器件设计和结构 发展趋势	287
一、阻感负载整流电路分析	226	一、技术趋势和设计挑战	287
二、整流电路带滤波电容时的 分析	227	二、结构上发生变化	288
三、电力电子装置的谐波抑制	229	三、需求决定一切	290
第五节 功率因数校正 (PFC) ...	232	四、应用于 EMI 及 ESD 的新型片式	
一、无源 PFC 电路	233		
二、有源 PFC 方法分类	236		
三、有源功率因数校正电路	237		

元器件	290	EMC 新指令	300
第六节 设计举例：野战弹药防静电		附录 C 中华人民共和国通信行业标准：	
包装设计	292	移动通信基站防雷与接地设计	
附录 A 中华人民共和国无线电管理		规范	311
条例	295	参考文献	315
附录 B 欧盟 2004 年 12 月 15 日颁布的			

Chapter 1

第一章 绪 论

21 世纪将是中国逐渐从“中国制造”走向“中国创造”的新时期。创造对中国来说，既是机遇更是挑战。创造的核心，是一种广义的设计能力，其中就包括电磁兼容设计的能力。纵观世界各发达国家，无不以电磁兼容设计能力作为核心竞争力之一。

我们还面临摩尔定律的挑战。第一块平面集成电路发明仅 4 年的时间，1964 年 Intel 公司的创始人之一摩尔（Goodon E. Moore）作出了一个著名的预测，并于 1970 年得到证实，这个预测就是摩尔定律。摩尔定律指出：集成电路的集成度每三年增长 4 倍，特征尺寸每三年缩小 4 倍或逻辑密度每 18 个月翻一番。这个定律指导着四十多年来的集成电路发展，并继续支持着微电子技术的发展。例如，2000 年一块 Pentium 4 Processor 上集成了 42000000 个晶体管。据报导，预测 2015 年 intel 微处理器能在 1in^2 模板上集成 200 亿至 300 亿个晶体管。摩尔定律最早指出了电子产品的发展方向：更小、更快、更低的成本、更短的面市周期。电子产品的发展受到这个经典法则的制约。现在，终端用户的要求，迫使所有电子产品供应商一定要遵循这个定律。

摩尔定律还预示：电磁兼容问题将以指数规律迅速增长。

21 世纪是电子产品的新世纪，缩短设计周期意味着产品必须能做到首件工作正常。我们已经不再可能执行多次产品创建、测试、再设计的循环过程了。如果电磁兼容性问题不能从产品开始研发到设计完成前认真加以解决，产品将无法正常工作。

企业为了保持竞争性，必须做好电磁兼容设计，影响研发进度并造成产品交货推迟，会使企业付出最昂贵的代价。

能解决这些问题的工程师将会决定未来。

| 第一节 电磁骚扰及其危害 |

随着现代科学技术的发展，电气及电子设备的数量及种类不断增加，使电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境中，如何减少相互间的电磁骚扰，使各种设备能正

常运转，是一个急待解决的问题；另一方面，恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响。

电磁骚扰发射 EMI (Emission) 是人们早已发现的古老问题。1881 年英国著名科学家希维赛德发表了《论干扰》的文章，这是研究骚扰问题最主要的早期文献。1883 年法拉第发现电磁感应定律，指出：变化的磁场在导线中将产生感应电动势。1884 年麦克斯韦引入位移电流的概念，指出变化的电场将激发变化的磁场，并由此预言电磁波的存在。这种电磁场的相互激发并在空间传播，正是电磁骚扰存在的理论基础。1887 年柏林电气协会成立了“全部干扰问题委员会”，成员包括著名的赫姆霍兹、西门子等人。1888 年赫兹用实验证明了电磁波的存在，同时该实验也指出了各种打火系统向空间发射电磁骚扰，从此开始了对电磁骚扰问题的实验研究。1889 年英国邮电部门研究了通信骚扰问题，同期美国的《电子世界》杂志也刊登了电磁感应方面的论文。1934 年英国有关部门对 1000 例骚扰问题进行了分析，发现其中 50% 是电气设备引起的。

民用射频干扰 RFI (Radio Frequency Interference) 的研究始于无线电广播。约从 20 世纪 20 年代始，各国都相继开展了广播业务，由于接收质量受到环境噪声的骚扰，工程刊物上开始发表有关文章。1933 年有关国际组织在巴黎举行了一次特别会议，研究如何处理国际性无线电骚扰问题。与会者普遍认为，为避免商品贸易和无线电业务中出现障碍，需要在无线电骚扰测试方法和限值方面保证有一定的统一和制定相关的国际标准。会议建议由国际电工委员会 (IEC) 和国际广播联盟 (UIR) 的国家委员会，并邀请有关国际组织，共同组织一个联合委员会。1934 年 6 月 28~30 日在巴黎举行了国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 第一次正式会议，从此开始了对电磁骚扰及其控制技术的世界性有组织的研究。

那么，究竟什么是电磁干扰 (Electromagnetic Interference) 和电磁骚扰呢？

电磁干扰是指电磁骚扰 (Electromagnetic Disturbance) 引起的设备、传输通道或系统性能的下降。这里，电磁骚扰是指任何可能引起装置、设备、系统性能降低或者对有生命、无生命物质产生损害作用的电磁现象。可见，电磁骚扰仅仅是客观存在的一种物理现象，而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。严格地说，凡是用电的设备，无论是电网供电，还是电池供电，都会向外发出有害的电磁能，称为电磁发射 (electromagnetic emission)，即：从骚扰源向外发出有害电磁能的现象。例如，只要把两个以上的元器件置于同一环境中，工作时就会产生电磁干扰的后果，引起性能降低 (degradation of performance)，即：装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离。这里要指出：

- 1) 电磁骚扰只有在影响敏感设备正常工作时，才构成电磁干扰。
- 2) 电磁干扰指的是能引起性能降低的后果。
- 3) 电磁骚扰指的是能引起这种性能降低的客观现象。
- 4) 用一种可以测量的量，例如电压、电流、场强或功率，来描述电磁骚扰现象或电磁干扰后果时，称“骚扰电压”、“骚扰电流”、“骚扰场强”或“骚扰功率”，而不是

“干扰电压”、“干扰电流”、“干扰场强”或“干扰功率”。

随着科学技术的发展，人们在生产及生活中使用的电气及电子设备的数量越来越多，这些设备在工作的同时，往往要产生一些有用或无用、甚至有害的电磁能量，这些能量会影响其他设备或系统的工作，这就是电磁骚扰。在两个系统之间的骚扰，称为系统间骚扰，在系统内部各设备之间的骚扰称为系统内骚扰。有人将电磁骚扰的危害程度分为灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的和使人烦恼的五个等级，那么电磁骚扰究竟有哪些危害呢？

首先，我们介绍几个国外航天系统的故障事例。

(1) 土星 V—阿波罗 12 事件。1969 年 11 月 14 日上午，土星 V—阿波罗 12 火箭——载人飞船发射后，飞行正常。起飞后 36.5s 后，飞行高度为 1920m 时，火箭遭到雷击。起飞后 52s，飞行高度为 4300m 时，火箭又遭到第二次雷击，这便是轰动一时的大型运载火箭——载人飞船在飞行中诱发雷击的事件。故障分析及试验研究的结果表明，此次事故是由于火箭及其火箭发动机火焰所形成的导体（火箭与飞船共长 100m，火焰折合导电长度约 200m）在飞行中使云层至地面之间及云层至云层之间，人为地诱发了雷电造成的。

(2) 丘辟特导弹雷击事件。1961 年秋，一系列的雷电使部署在意大利的美国丘辟特导弹武器系统多次遭到严重的损坏。甚至系统中隔离较好，原以为与外界环境无关的元器件也受到了严重的影响。

(3) 民兵 I 号导弹飞行故障。民兵 I 号导弹的遥测试验弹多次发射成功后，1962 年开始进行战斗弹状态的飞行试验，前两发导弹均遭到失败，这两发导弹的故障现象相似，都是在 I 级发动机关机前炸毁的。一个高度为 7.6km，另一个为 21.8km。在炸毁前这两发导弹的制导计算机均受到脉冲干扰而失灵。经过分析，故障是由于导弹飞行到一定高度时，在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电，产生骚扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。

(4) 大力神 III C 运载火箭故障。1967 年大力神 III C 运载火箭的 C-10 火箭在起飞后 95s，飞行高度 26km 时，制导计算机发生故障。C-14 火箭起飞后 76s，飞行高度为 17km 时，制导计算机也发生了故障。经过分析，故障原因是，制导计算机中采用了液体循环冷却方案，冷却液在外部带有钢丝编织网套的聚四氟乙烯软管内流动。此钢丝套软管是用经阳极化处理的铝支架分段固定，由于金属网套的不少处因支架阳极化氧化层破裂而接地。但有几段未接地，当冷却液流动时，金属网套没有接地的部分与火箭地之间产生电压，当火箭飞行高度增加，气压下降到一定值时，此电压产生的火花放电使计算机发生故障。

(5) 欧罗巴 II 号火箭故障。欧罗巴 II 号火箭的第一发（代号 F-11）于 1971 年 11 月 5 日发射。火箭起飞后 105s，高度约 27km，制导计算机发生故障，姿态失控。约 1min 后，火箭炸毁。故障分析与模拟试验的结果表明，火箭在主动段飞行中产生了静电荷。这些电荷逐渐积累并贮存于介质材料的表面。由于气动加热，介质材料温度升高，其电阻值相应减小。对于静电而言，介质材料便从绝缘体变为导体，这样，部分电荷便转移到相邻的未接地金属体上，当飞行高度增加，气压下降到一定值时，即发

生静电放电而引起计算机故障，从而导致飞行失败。

(6) 侦察兵火箭飞行故障。1964年美国的侦察兵火箭发射后飞行正常，但在Ⅱ级发动机点火后不久即炸毁。初步分析认为，由于指令自毁电路级间连线与Ⅱ级点火电路共用同一分离插头，点火电路及自毁电路是由同一电池供电，而且是共用负母线。当气压降低到一定值时，在级间分离插头的点火电路接点与自毁电路接点之间出现电弧放电，而且在热分离时，在插头护盖盖好之前，发动机火焰等离子体使电弧大为加速，这样形成的低电阻电离通道使Ⅱ级自毁系统引爆。

(7) 德尔它火箭事故。1964年在肯尼迪角发射场，德尔它运载火箭的Ⅲ级X-248发动机发生意外的点火事故，死亡三人。在塔尔萨城对德尔它火箭进行测试时，也发生过一起Ⅲ级X-248发动机意外点火事故。分析结果表明，在肯尼迪角发射场的事故是由于操作罩在第三级轨道观测卫星上的聚乙烯罩衣时，造成静电荷的重新分布，结果使漏电流经过发动机的一个零件达到点火电爆管的壳体而引起误爆。在塔尔萨城发生的事故是由于一个技术员戴着皮手套偶然磨擦发动机喷管的塑料隔板，使发动机点火电爆管引线上感应静电荷而引起误爆。

(8) 宇宙神导弹爆炸事件。一发宇宙神导弹在起飞后数秒即发生爆炸，并使发射台造成严重损坏。这是因为接地汇流条与连接面之间由于连接件紧固不够而产生锈蚀，此锈蚀表面形成了非线性整流结（锈螺栓效应），从而产生了可使指令接收机收到虚假指令信号而引起爆炸。

(9) 民兵Ⅰ号导弹系统故障。民兵Ⅰ号导弹系统按MIL-E-6051C军标进行测试时，出现了一些由于大的瞬态过程引起的系统问题。比较典型的问题是接至喷管控制装置的大起动电流（约为1000A）产生了虚假状态显示。

(10) 土星Ⅰ号故障。在对土星Ⅰ号SA-5火箭进行发射前测试时，并未向火箭发出自毁指令，但自毁指令接收机却收到了自毁信号。这是由于对另外一个火箭发出的自毁信号与两个遥测通道的载频相混频形成了与自毁指令接收机所需频率相同的信号。混频作用是由围绕火箭的金属框架与服务结构之间出现的“锈螺栓效应”造成的。

(11) 土星Ⅰ号S-I-3级的骚扰。当土星Ⅰ号S-I-3级进行自动发射程序测试时，在电缆网中出现了大的瞬态过程。此骚扰电平使检测工作难以正常进行。经研究发现，此骚扰是箭上发射机的射频能量经过解调及网络作用引起的。

(12) 其他骚扰问题。在运载火箭进行系统测试时，由于电源切换、技术状态变换、继电器或步进电磁元件动作时间所引起的瞬态骚扰，会对制导计算机、稳定控制电子电路等敏感电路产生骚扰而使之不能正常工作。

其次，我们再介绍一些其他事例。

美国航空无线电委员会RTCA曾在一份文件中提到，由于没有采取对电磁骚扰的防护措施，一位旅客在飞机上使用调频收音机，使导航系统的指示偏离 10° 以上。1979年2月我空军某部在飞行训练中，曾受到“80”型超短波理疗机的严重骚扰，致使通信中断，演习停止。20世纪80年代初，我国还曾发生由于对骚扰场强计量不准确，导致某武器误触发和引爆的严重事故。因此，对舰载、机载、星载及地面武器、弹药的电磁环境都有严格要求。1993年美国西北航空公司曾发表公告，限制乘客使用移动电

话、调频收音机等，以免骚扰导航系统。

雷击引起的浪涌电压，属于高能电磁骚扰，具有很大的破坏力。1976年至1989年我国南京、茂名、秦皇岛等地的油库以及石化厂，均因遭受雷击引爆原油罐，造成惨剧。1992年6月22日傍晚，雷电击中北京国家气象局，造成一定的破坏和损失。因为雷击有直接雷击和感应雷击两种，避雷针只能局部地防护直接雷击，对感应雷击则无能为力，对感应雷击则需采用电磁兼容防护措施。

此外，长期受到电磁辐射还将影响人体健康和造成电磁污染。高频辐射大于一定限值时，会使人产生失眠、嗜睡等植物神经功能紊乱症状，以及脱发、白血球下降、视力模糊、晶状体混浊、心电图改变等。1982年因北京582干扰台电磁辐射对周围环境造成的严重污染，曾引起一场纠纷。后来，在中央领导同志过问下，经过数月的测试和论证，以关闭干扰台而告终，纠纷才得以圆满解决。由于电磁骚扰的频谱很宽，可以覆盖0~400GHz频率范围，电磁污染已和水与空气受到的污染以及噪声污染一样，正在引起人们极大的关注。

综上所述，可以看到，电磁骚扰有可能使设备或系统的工作性能偏离预期的指标或使工作性能出现不希望的偏差，即工作性能发生了“降级”。甚至还可能使设备或系统失灵、寿命缩短或系统效能发生不允许的永久性下降，严重时，还能摧毁设备或系统，影响人体健康，若不引起重视，势必将受到不同程度的惩罚，甚至为此付出巨大的代价。

为了保障电子设备和系统的正常工作，许多国家和国际组织都先后开展了控制和抑制电磁骚扰的研究。早期的研究还只是局限于抗电磁骚扰，只是从防范或补救出发，不仅费用高，而且效果差。自从电磁兼容这个新概念出现以后，抗电磁骚扰技术才进入了一个新的时期，即从防范或补救的时期，进入到主动预测分析、主动设计、主动采取防护措施的新时期。

| 第二节 电 磁 兼 容 |

电磁兼容 EMC (Electromagnetic Compatibility)，对于设备或系统的性能指标来说，直译为“电磁兼容性”，但作为一门学科来说，应该译为“电磁兼容”。美国 IEEE 学报 Transaction RFI 分册于 1964 年改名为 EMC 分册，若以此作为电磁兼容学科形成的标志，距今已 40 余年了。40 多年来，电磁兼容的基础不断深化，内容不断发展，范围不断扩大，系统不断完善。

电磁兼容是研究在有限的空间、时间和频谱资源等条件下，各种用电设备（广义的还包括生物体）可以共存，并不致引起降级的一门科学。电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境下能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受电磁骚扰的能力。它有以下三方面的含义：

1) 电磁环境应是给定的或可预期的。

2) 设备、分系统或系统不应产生超过标准或规范所规定的电磁骚扰发射（EMI）限值的要求。电磁骚扰发射就是从骚扰源向外发出电磁骚扰能量的现象，它是引起电

磁骚扰的原因。

3) 设备、分系统或系统应满足标准或规范所规定的电磁敏感度 (EMS) 限值或抗扰度 (immunity) 的要求。电磁敏感度, 即在有电磁骚扰的情况下, 设备、分系统或系统不能避免性能降低的能力。抗扰度即设备、分系统或系统面临电磁骚扰时不降低运行性能的能力。

怎样才能实现电磁兼容呢? 这要从分析形成电磁干扰后果的基本要素出发。由电磁骚扰源发射的电磁能量, 经过耦合途径传输到敏感设备, 这个过程称为电磁干扰效应。因此, 形成电磁干扰后果必须具备三个基本要素:

(1) 电磁骚扰源。任何形式的自然或电能装置所发射的电磁能量, 能使共享同一环境的人或其他生物受到伤害, 或使其他设备、分系统或系统发生电磁危害, 导致性能降级或失效, 即称为电磁骚扰源。

(2) 耦合途径。即传输电磁骚扰的通路或媒介。

(3) 敏感设备 (Victim)。是指当受到电磁骚扰源所发射的电磁能量作用时, 会受到伤害的人或其他生物, 以及会发生电磁危害, 导致性能降级或失效的元器件、设备、分系统或系统。许多元器件、设备、分系统或系统可以既是电磁骚扰源又是敏感设备。

这三个基本要素也是电磁兼容设计的依据。为了实现电磁兼容, 必须从上面三个基本要素出发, 运用技术和组织两方面措施。所谓技术措施, 就是从分析电磁骚扰源、耦合途径和敏感设备着手, 采取有效的技术手段, 抑制骚扰源, 消除或减弱骚扰的耦合, 降低敏感设备对骚扰的响应或增加电磁敏感度电平。为了对人为骚扰进行限制, 并验证所采用的技术措施有效性, 还必须采取组织措施, 制订和遵循一套完整的标准和规范, 进行合理的频谱分配, 控制与管理频谱的使用, 依据频率、工作时间、天线方向性等规定工作方式, 分析电磁环境并选择布置地域, 进行电磁兼容性管理等。为了实现电磁兼容, 必须深入研究以下五个问题:

1) 对于电磁骚扰源的研究, 包括电磁骚扰源的频域和时域特性, 产生的机理以及抑制措施等的研究。

2) 对于电磁骚扰传播特性的研究, 即研究电磁骚扰如何由骚扰源传播到敏感设备, 包括对传导骚扰和辐射骚扰的研究。传导骚扰是指沿着导体传输的电磁骚扰, 辐射骚扰即由元器件、部件、互连线、电缆或天线辐射的电磁骚扰。

3) 对于敏感设备抗干扰能力的研究, 这种抗干扰能力常以电磁敏感度或抗扰度表征, 电磁敏感度电平越小, 抗扰度越低, 抗干扰能力越差。

4) 对于测量设备、测量方法与数据处理方法的研究, 由于电磁骚扰十分复杂, 测量与评价需要有许多特殊要求, 例如测量接收机要有多种检波方式、多种测量带宽、大过载系数、严格的中频滤波特性等, 还要求测量场地的传播特性与理论值符合得很好, 如何评价测量结果, 也是个重点问题, 需要应用概率论、数理统计等数学工具。

5) 对于系统内、系统间电磁兼容性的研究。系统内电磁兼容性是指在给定系统内部的分系统、设备及部件之间的电磁兼容性, 而给定系统与它运行时所处的电磁环境与其他系统之间的电磁兼容性即系统间电磁兼容性, 这方面的研究需要广泛的理论知识与丰富的实践经验。

电磁兼容性是电子设备或系统的主要性能之一。电磁兼容设计是实现设备或系统规定功能、使系统效能得以充分发挥的重要保证。必须在设备或系统功能设计的同时，进行电磁兼容设计。目前，电子设备或系统设计的重点已由逻辑设计和功能设计转移到电磁兼容设计上来。经验证明：速度是制胜的法宝，在设备或系统设计的初始阶段，同时进行电磁兼容设计，把电磁兼容的大部分问题解决在设计定型之前，可得到最高的效费比（见图 1-1）。如果等到生产阶段再去解决，非但在技术上带来很大的难度，而且会造成人力、财力和时间的极大浪费。EMC 设计的效费比同时也说明了 EMC 介入时间与成本的关系。

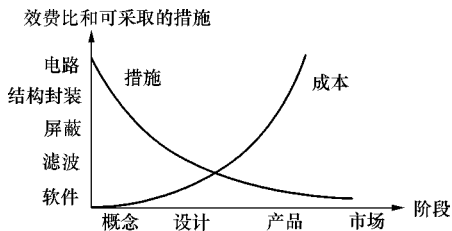


图 1-1 效费比

早期的抗电磁骚扰只是被动地、事后从防范或补救出发，不仅费用高，而且效果差。例如，测试修改法，不但具有盲目性，而且成本高，时间长，甚至失败，因此是一种冒险的方法，最终的产品也不是最佳方案。实现电磁兼容则是一项系统工程，在方案阶段就主动预防、整体规划，进行预先评估、预测分析，主动进行电磁兼容设计，有针对性的主动采取保护措施。因此，成本低、时间短、成功率高，而且可以达到最优化。

还应当指出，由于电磁兼容是抗电磁骚扰的扩展与延伸，它研究的重点则是设备或系统的非预期效果和非工作性能，非预期发射和非预期响应，而在分析骚扰的叠加和出现概率时，还需按最不利的情况考虑，即所谓“最不利原则”，这些都要比研究设备或系统的工作性能复杂得多。

总之，电磁兼容是一门综合性的边缘学科，其核心仍然是电磁波，其理论基础包括数学电磁场理论、电路理论、微波理论与技术、天线与电波传播、通信理论、材料科学、计算机与控制理论、机械工艺学、核物理、生物医学以及法律学、社会学等内容。现在，电磁兼容学已成为国内外瞩目的迅速发展的学科，预计在 21 世纪，它还将获得更加迅速的发展。

| 第三节 电磁兼容设计 |

电磁兼容设计的目的是使所设计的电子设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容。其要求是使电子设备或系统满足 EMC 标准的规定并具有两方面的能力：① 能在预期的电磁环境中正常工作，无性能降低或故障；② 对该电磁环境不是一个污染源。

在电子系统的开发中，要考虑到系统、分系统和设备与周围环境之间的相互骚扰。每个设计者都应在电子系统的开发与设计过程中采取正确的设计措施，按照标准规定的极限值，减小电子系统本身的 EMI 发射，并使电子系统的抗扰度满足标准的规定。有 80% 的 EMC 问题可以在设计与开发过程中解决。否则，当整个系统完成以后，工

工程师们将花成倍的力气去解决系统的骚扰问题。抗扰度问题也是这样。

电磁兼容设计又可分为系统内和系统间两部分，主要是对系统之间及系统内部的电磁兼容性进行分析、预测、控制和评估，实现电磁兼容和最佳效费比。

一、系统间电磁骚扰控制技术

1. 对有用信号的控制

对有用信号的控制包括：频谱管理和规定发射功率、信号类型（调制和带宽）、天线的空间覆盖范围、方向性和极化、使用时间和地点等。

在设计阶段还应尽量减小镜像频率响应、谐波频谱电平以及乱真发射和乱真响应。

2. 对人为骚扰的控制

人为骚扰以其发生源可知并且可控为特点。系统间人为骚扰源主要是其他系统的发射机谐波和乱真发射、高压输电线、医疗设备等的骚扰发射，这需要按照有关的EMC标准来控制。

3. 对自然骚扰的控制

自然骚扰以其发生源不可控制为特点，只有在系统性能设计时加以防护。例如，接收机灵敏度指标按内部骚扰和天电骚扰的总和来确定，以及对雷击浪涌、电快速瞬变脉冲群和静电放电采取适当的防护措施等。

二、系统内电磁兼容控制技术

通常将系统内电磁兼容设计分为五个部分：印制电路板设计和元器件的选用、滤波、屏蔽、布线以及接地等。

| 第四节 电磁兼容设计的内容和方法 |

电磁兼容设计的基本内容是指标分配和功能分块设计。也就是首先要根据有关的标准（国际、国家、企业、特殊标准等）把整体电磁兼容指标逐级分配到各功能块上，细化成系统级的、设备级的、电路级的和元件级的指标。然后，按照要实现的功能和电磁兼容指标进行电磁兼容设计。如：按电路或设备要实现的功能，按骚扰源的类型，按骚扰传播的渠道等。具体有时钟电路设计、防静电设计、防雷设计、防地电位升设计等。在电磁兼容设计中许多应用课题要解决，如电磁波的散射、透射、传输、孔缝耦合，绕射理论等在实际问题中的求解问题，各种骚扰源的机理和特性，各种骚扰参数的计算和测试，各种结构的屏蔽效能，各种防护方法、测试方法、选用标准等等。

2000年以前，我国许多企业几乎不对产品进行电磁兼容设计，只是在市场抽检或申请生产许可证检测时才发现电磁兼容问题，此时才被动地、从防范或补救出发，对产品进行修改，既所谓“测试修改法”，必然带来许多困难与浪费，这是一种冒险的方法。不仅费用高，而且效果差，不但具有盲目性，而且反复次数多，时间长，甚至失败，最终的产品也不是最佳方案。针对这种情况，2000年5月，在“全国电磁兼容标准与质量认证研讨会”上，本书作者首次提出了“分层与综合设计法”，即电磁兼容设计的新方法，受到与会两百多位企业家和大会执行主席的关注。2000年以来，先后为各科研院所、高校、部队和企业作了百余场专题报告和培训，推广此方法，还在研发

现场解答和解决各种实际问题，协助各单位制定了“产品电磁兼容设计规范”和“产品电磁兼容设计评审表”，帮助各单位走出“测试修改法”的“怪圈”，做到在产品的设计之初，就主动进行电磁兼容设计，既降低了成本，又缩短了研发时间，使产品提前投放市场，也使“分层与综合设计法”进一步充实和完善，为我国电磁兼容事业做出了贡献。

“分层与综合设计法”，即在进行电磁兼容设计时，根据所采取的措施在实现电磁兼容时的重要性，分层依次进行设计。例如，第一层为有源器件的选型和印制电路板设计，第二层为接地设计，这两层是从产品设计的源头根本解决 EMC 问题。第三层为屏蔽设计，第四层为滤波设计和瞬态骚扰抑制设计。并且在每一层进行接地、屏蔽和滤波的综合设计和软件抗骚扰设计。

所以，产品的电磁兼容性是靠电磁兼容设计获得的。

目前，电子信息产业的行业竞争日益激烈，使得少数企业为降低成本而不惜牺牲产品的电磁兼容性。但是，随着电子产品性能的不断提高，电磁兼容性问题会愈来愈突出，不可回避。例如 IT 设备 CPU 的主频每个月都在增加、总线速度不断加快、板卡速度也在频繁升级、开关电源的广泛使用、开关电源小型化使得开关频率不断增加、显示器的数字化程度越来越高、支持的视频带宽也越来越宽，使这类产品的电磁兼容设计越来越复杂。这个事实更要求我们认真地做好电磁兼容设计。经验证明，只要我们尽早进行电磁兼容设计，成本不会增加太多，根据分层与综合设计法，任何复杂的电磁兼容设计都是可以迎刃而解的。

| 第五节 电磁兼容性管理 |

为使系统或设备具有良好的电磁兼容性，还应对全寿命期间的各个阶段实施 EMC 管理。全寿命期一般包括论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、定型阶段以及生产和使用阶段。各阶段 EMC 管理的内容如下：

一、论证阶段

- 1) 分析预期的电磁环境，确定电磁环境电平。
- 2) 提出在预期电磁环境中的 EMC 技术指标要求，将 EMC 设计纳入到系统研发流程中去。
- 3) 分析电磁环境效应。

二、方案阶段

- 1) 成立 EMC 技术组，这是由各方面代表组成的专家咨询小组，为工程管理的决策、评审、分析和研究提供技术咨询。

2) 制定 EMC 大纲，它是研制期间最高级的 EMC 管理文件，它说明为达到所提出的 EMC 技术指标要求而采用的总体途径、规划和设计准则，并说明 EMC 管理的组织和职责、技术要求等。

- 3) 选用和剪裁适用的标准，即对标准中的各项要求进行分析和选择，必要时进行