

TURING

图灵电子与电气工程丛书

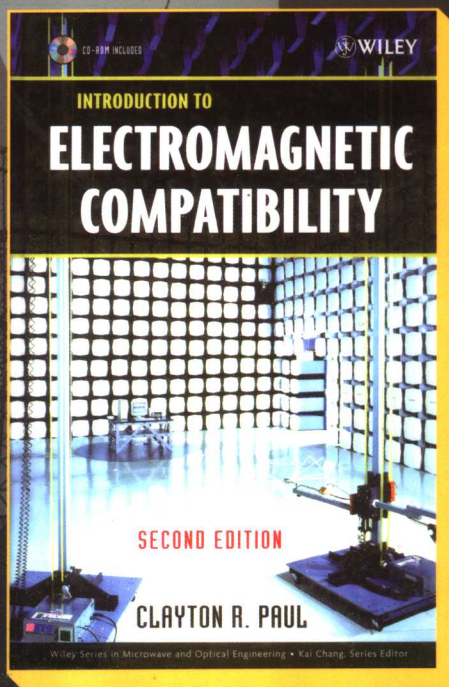
WILEY

电磁兼容导论

(第2版)

Introduction to
Electromagnetic Compatibility
(Second Edition)

[美] Clayton R. Paul 著
闻映红 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

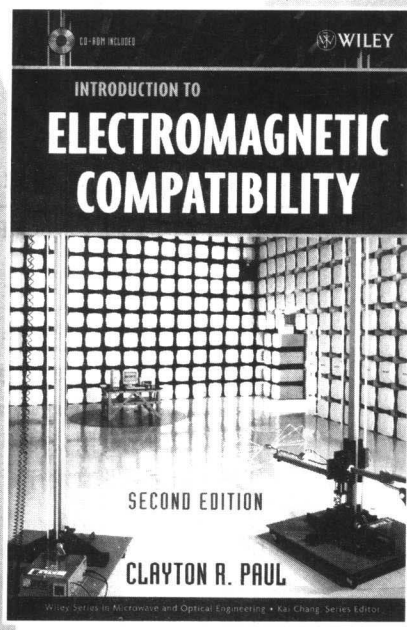
图灵电子与电气工程丛书

电磁兼容导论

(第2版)

Introduction to
Electromagnetic Compatibility
(Second Edition)

[美] Clayton R. Paul 著
闻映红 等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容导论 (第2版) / (美) 保罗 (Paul, C. R.) 著; 闻映红等译.
—北京: 人民邮电出版社, 2007.9
(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-16251-9

I. 电... II. ①保...②闻... III. 电磁兼容性—概论 IV. TN03
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 071321 号

内 容 提 要

本书全面系统地讲述电磁兼容 (EMC) 的基本原理及其应用, 包括 EMC 概论、电子系统的 EMC 要求、电磁场理论、传输线、天线、元件的非理想性能、信号谱、辐射发射和敏感度、传导发射和传导敏感度、串扰、屏蔽、静电放电、EMC 的系统设计等内容。

本书讲述深入浅出, 配合典型例证, 实用性强。本书可作为高等院校相关专业电磁兼容课程教材, 也可供 EMC 设计开发人员参考。

图灵电子与电气工程丛书

电磁兼容导论 (第2版)

-
- ◆ 著 [美] Clayton R. Paul
 - 译 闻映红 等
 - 责任编辑 朱 巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16
印张: 40.25
字数: 955 千字 2007 年 9 月第 1 版
印数: 1—4 000 册 2007 年 9 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-3209 号

ISBN 978-7-115-16251-9/TN

定价: 99.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

译者序

电磁兼容界权威Clayton R. Paul先生在继1992年出版了《电磁兼容导论》这本教材后,于2005年出版了该教材的第2版。第2版较之第1版,内容更丰富,编排的章节结构也更合理。另外,随着各国电子产品准入制度的变革,EMC的重要性在全球的提升有目共睹,各国的EMC标准也趋于严格和普遍,因此,各方面对EMC人才的需求越来越多,要求也越来越高。这就要求作为EMC基础教材的本书也要随着时代的发展、随着EMC的发展而发展。也正基于此,在2005年笔者翻译了第1版的《电磁兼容导论》后,也承担了新版的翻译工作。

《电磁兼容导论(第2版)》有了实质性的改写和修正,目的是要及时反映EMC领域的实际发展,如第2章中的修改都是为了反映美国和全世界政府对涉及EMC规范的修订。第4章中增加和强调了信号完整性这部分内容,这主要是因为数字电路发展到现在,速度越来越快,10年以前考虑问题、解决问题的方式方法已经不再适用。另外,在第10章中引入了数值计算方法,能使我们更好地利用现代的计算机技术去分析复杂的电磁现象。第2版还增加了几个附录,作者在附录中给出了几个有用的计算机程序,以便于读者更好地掌握本书的基础理论知识。

本书的出版得到了北京交通大学电子学院和人民邮电出版社的大力支持,也凝聚了许多同学的共同努力,在这里,译者衷心感谢宋维嘉、李焕然、李莹莹、肖猛和单秦同学为本书的翻译整理校对和图文录入所付出的辛勤劳动。因译者水平和时间所限,本书内容不当之处,敬请各位同行指正。

译者
2007年6月

前 言

本书可作为大学电磁兼容 (EMC) 课程的教材, 也可作为对EMC设计感兴趣的专业技术人员参考书, 其第1版出版于1992年。读者此前应该已经学习了大学本科电气工程专业的基本课程——电路分析、信号与系统、电子学和电磁场。本书构筑于这些基本技能、基本概念和基本原理之上, 并将它们应用于现代电子系统的设计中, 以使得这些系统可以与其他电子系统兼容运行, 同时也使得它们能符合各项有关辐射电磁发射和传导电磁发射的政府法规。实质上, EMC主要解决干扰问题, 以及在电子系统的设计过程中防止干扰的产生。

如电路分析和电子学等其他更传统的科目一样, EMC课程很快成为了电气工程 (EE) 学科的一个重要分支。笔者早在上世纪80年代就在肯塔基大学为电气工程本科生开设EMC方面的选修课, 至今这一课程还在继续开设, 笔者目前所在的Mercer大学也把EMC作为选修课开设。EMC课程日益重要, 部分源于当今现代化社会中数字电子产品的快速发展和广泛应用。目前, 美国乃至全世界的很多学校的电气工程课程表中都有EMC的身影。毫无疑问, 开设EMC课程的学校的数量也将持续快速增长。EMC的重要性如此快速提高的原因归结于: (1) 当今社会中数字电子产品的快速发展和广泛应用; (2) 全世界范围对数字电子产品的辐射和传导噪声发射强制实施政府限制。1979年以前, 美国不限制其境内所销售数字电子产品的电磁噪声发射。数字电子产品的制造商自愿采用各自限值以制造出其电磁发射不会干扰其他电子设备的合格产品。此外, 制造商还测试其产品, 以确定产品对其他干扰源的电磁发射的敏感度, 从而使产品能在预期环境中可靠工作。1979年, 美国联邦通信委员会 (FCC) 颁布了一项法律, 对所有在美国市场上出售的数字设备 (使用9kHz或以上时钟的设备和使用“数字技术”的设备) 的辐射发射和设备电源线上的传导发射实施法定限值, 这本来是制造商自愿做的事情转变成了必须做的法定要求。这使得在美国市场上出售的数字设备的噪声发射必须低于FCC设定的限值; 否则, 无论设备多么创新, 它都是不合法的。全世界的许多国家主要是欧洲国家, 已经在本地颁布了类似的法律。这使得生产电子产品的公司在产品设计上有了极大的变化。产品具有一定创新性的用途和功能已经不再是最关键的问题, 它如果不遵循这些法定限值, 就不能投放市场。

自本书1992年面世以来, EMC领域发生了一些重大变化, 其重要性在大学教育乃至整个电子行业中都大大增加了。作为美国生产的电子产品的主要市场, 欧洲国家组成了欧盟, 采用比上世纪末更加严格和深入的EMC标准。数字产品的处理速度 (时钟和数据传输速度) 在以激动人心的速率提高。20世纪80年代中期, 时钟速度还是数十兆赫兹 (MHz) 的数量级, 而现在个人计算机的时钟频率可达3GHz以上, 在美国其售价还不到500美元, 这大大增加了产品符合政府规定的EMC标准的困难。数字设备的低价

和高速度意味着，既要增加手段使设备符合EMC标准，又要避免不必要的花费，采用有效的EMC设计至关重要。现如今，即使模拟系统的使用频率也逐步提高到GHz范围，要找到一个设备（包括洗衣机、汽车等）不使用数字电路提高产品性能很困难。综上所述，强制性的政府法规要使数字产品的电磁噪声发射最小，产品开发周期缩短和开发成本快速降低，这些都表明所有电气工程师必须接受适当的EMC设计技术的培训。没有经过EMC设计培训的电气工程师在工作中将遇到很大困难。

本书进行了大幅度的改写和修正，以反映EMC领域的发展。本书对多章进行了重新排序，并对其内容做了修正。第1章基本上保留了第1版的内容，增加了对电磁波概念的重要讨论。第2章虽然保持了其在大纲中的原来位置，但进行了大量的修改，以反映美国和世界各国政府对法规标准的重大修订。第3章来自第1版中的第7章，这是因为作者觉得信号谱是EMC中最重要的主题之一，这样的安排会使读者早一步以信号谱的形式来考虑问题。第3章也包含了用SPICE（以集成电路分析为重点的仿真程序）[PSPICE（个人计算机版SPICE）]来计算信号谱的内容。第4章进行了很大的修改，新增了信号完整性的内容。10多年前，当本书第1版刚出版时，时钟和数据速率都在较低的MHz范围，因此印制电路板（PCB）上的连接盘的长度不会有什么影响，它们的电磁效应一般都可以忽略。经过门电路的传输时延为数10ns数量级，是信号传输线引起的时延中的主要时延。现在，PCB上的所有连接盘实际都必须作为传输线来对待，否则，产品将不能正常工作。这是PCB上走线的长度成为波长中的主要部分所带来的结果，因为数字信号的频谱分量大大增加了。这些传输线的匹配现在并不是可有可无的。第4章再次强调了在分析这些引线中SPICE（PSPICE）的使用。第5章来自第1版中的第6章，作为对一些重要概念的初步讨论。这章进行了修改，但保留了原来大部分内容。

第6章基本上与第1版中的第9章相同。它出现在辐射发射的主题之前，笔者认为这样的顺序比较恰当。第7章基本上与第1版中的第5章相同。第8章基本上与第1版中的第8章相同，但进行了一些修改。第9章是对第1版中的第10章进行了大量的修改而来的，在数学推导上进行了很大的简化。第9章在三方面做了重大修改。第一，弱耦合的电短传输线的简单感性-容性耦合模型移到了这一章的前面，它的推导用有些直观的证明以简化讨论。第二，用一种简单的方式说明利用静态数值算法（矩量法）来计算每单位长度的参数，以使读者熟悉越来越有用和越来越重要的现代数值计算方法。这里及附录C介绍了FORTRAN程序，可以非常准确地计算带状电缆、PCB连接盘结构、耦合微带线和耦合连接盘的参数，这些程序包含在随书提供的资源中¹。第三，描述了建立耦合传输线的精确SPICE（PSPICE）子电路模型的FORTRAN程序，对其应用的实例阐述贯穿整章。该程序也在随书资源中提供。它的重要性在于使读者能够很容易地研究带有实际负载（如电容、电感、电阻和逻辑门等）的PCB上的复杂（实际的）传输线的串扰，这种传输线的手动分析非常复杂。这里也向读者介绍了计算机辅助设计（CAD）仿真法的现代化应用，这种方法越来越重要也越来越普及。第10章基本上与第1版中的第11章相同。第1版中有关静电放电的第12章在第2版中不再作为单独的一章，其内容合并入最后一章即第11章（是第1版中的第13章）。

1. 随书资源请从图灵网站下载。——编者注

第11章在内容和组织结构上都进行了改写。现在它分为五个主题：11.1节，改变思考电气现象的方式；11.2节，术语“接地”的含义；11.3节，印制电路板（PCB）设计；11.4节，系统配置和设计；11.5节，诊断工具。这么做是为了让读者注意EMC的重要方面而不至于只见树木，不见森林。11.5节是本书新内容，反映了作者的观点，即设计一个在第一次测试中就通过基本标准的数字设备实际上是可能的。要能够确定引起不符合标准的确切原因，能够确定怎样以最少的附加成本和对产品开发周期的最小影响来使产品符合标准，这在当今要求制造低成本产品和缩短研发周期的时代是非常重要的。优势效应这一重要概念对快速诊断EMC问题和阐明EMC非常关键，这些也将在11.5节中讨论。

第2版的几个附录是新内容。附录A简要回顾了求解差分方程和电路的相量法；正弦稳态解法。这项技能对电气工程师来说是最重要和最基本的技能，它遍及了所有的电气工程领域，如电路分析、信号分析、系统分析、电子电路分析和电磁场分析。除非读者已经掌握了这项重要技能，否则就无法理解本书或任何其他电气工程图书，从而收获甚少。本附录是对这项关键技能作简要回顾。附录B 简要而充分地回顾了重要的电磁场原理和定律。与第1版将其放在正文中相比，这部分内容放在附录中更可取，因为这样可以避免破坏正文的流畅性。附录C描述了用来对复杂（但具有代表性的）传输线的串扰进行建模和预测的FORTRAN程序，该程序也包含在随书提供的资源中。附录D是有利用PSPICE程序对电路进行建模和仿真的短小精悍的指南。

本书强调了在EMC分析的所有方面用PSPICE进行模拟仿真，这反映了当前在EMC中对现代CAD工具的重视和使用。本书的另一重大创新是给出了计算例子和复习题。具体的计算例子直接放在对主要概念的讨论之后，告诉读者怎样求解重要的EMC问题；书中的清晰描述也使读者能够注意问题的求解技巧。此外，在讨论每个重要的主题之后，提供了大量的习题。复习题为简单问题形式，并给出了答案。因此，读者在研究主题之后能够迅速检验自己对该主题的理解程度。每章后面的大多数问题都是新的，答案在问题后面的方括号中给出，与第1版的格式一样。

作者在EMC行业中的许多同事对作者考虑EMC问题的思路产生了极大的影响，并对作者写作本书给予了很大帮助。值得一提的是，对作者的EMC观点产生重大影响的许多见解均来自于与Henry Ott先生的多次探讨。作者强烈推荐Ott先生的网站<http://www.hottconsultants.com>，它包含了对最新版法规的链接，更重要的是，它提供了很多非常详细的、大信息量的指南性文章和其他有关EMC的参考资料。作者也要感谢在1984年学术休假期间，在肯塔基州列克星敦的IBM信息产品部门（现在是Lexmark国际集团）所结识的EMC团队的同事，之后作者又在那里担任了近10年的顾问。与他们共同解决重要的EMC问题，这也是出版本书第1版的主要起因。尤其要感谢Donald R. Bush先生（已故）、Keith B. Hardin博士和Stephen G. Parker先生。Donald R. Bush先生后来成为作者的朋友，我们有30多年的友情，他在私人交情和工作上都对我有极深的影响。作者还要感谢Lexmark国际集团的John Fessler先生和我探讨了最新的政府法规。

Clayton R. Paul

2005年1月于佐治亚州梅肯市

目 录

第1章 电磁兼容 (EMC) 概论	1	4.3 时域解 (瞬态解)	138
1.1 EMC涉及的方面	2	4.4 高速数字的互连和信号完整性	154
1.2 EMC历史	6	4.5 传输线的正弦激励和相量解	177
1.3 例子	8	4.6 集总参数电路近似模型	191
1.4 电尺寸和波	9	习题	194
1.5 分贝与常用的EMC单位	15	参考文献	201
习题	28	第5章 元件的非理想行为	202
参考文献	32	5.1 导线	202
第2章 电子系统的EMC要求	33	5.2 印制电路板 (PCB) 连接盘	210
2.1 政府要求	33	5.3 元件引线的影响	212
2.2 额外的产品要求	57	5.4 电阻	214
2.3 产品的设计限制	58	5.5 电容	219
2.4 EMC设计的优点	59	5.6 电感	226
习题	61	5.7 铁磁性材料——饱和与频率 响应	228
参考文献	63	5.8 铁氧体磁珠	231
第3章 信号谱——时域和频域间的 关系	65	5.9 共模扼流圈	233
3.1 周期信号	65	5.10 电磁器件	235
3.2 数字信号波形的频谱	82	5.11 数字电路器件	239
3.3 频谱分析仪	98	5.12 元件可变性的影响	240
3.4 非周期波形的表示	102	5.13 机械开关	240
3.5 随机 (数据) 信号的表示	104	习题	247
3.6 SPICE (PSPICE) 在傅里叶分析 中的应用	107	参考文献	251
习题	115	第6章 传导发射与传导抗扰度	253
参考文献	121	6.1 传导发射测量	253
第4章 传输线和信号完整性	122	6.2 电源滤波器	258
4.1 传输线方程	124	6.3 电源	270
4.2 单位长度的电参数	126	6.4 电源和滤波器的放置	277
		6.5 传导抗扰度	278

习题	278	10.4 低频磁场的屏蔽	482
参考文献	280	10.5 孔缝效应	485
第7章 天线	281	习题	486
7.1 偶极子天线	281	参考文献	488
7.2 半波偶极子和四分之一波长 单极天线	285	第11章 EMC系统设计	489
7.3 天线阵	293	11.1 改变思考电气现象的方式	492
7.4 天线的特性	297	11.2 术语“接地”的含义	498
7.5 FRIIS传输方程	308	11.3 印制电路板(PCB)设计	519
7.6 反射的影响	310	11.4 系统配置和设计	533
7.7 宽带测量天线	321	11.5 诊断工具	546
习题	326	习题	551
参考文献	331	参考文献	552
第8章 辐射发射与辐射抗扰度	332	附录A 相量求解法	553
8.1 导线和PCB连接盘的 简单发射模型	332	A.1 求微分方程的正弦稳态解	553
8.2 导线和PCB连接盘的 简单抗扰度模型	351	A.2 电路正弦稳态响应的解法	555
习题	362	习题	557
参考文献	365	参考文献	558
第9章 串扰	367	附录B 电磁场方程和电磁波	559
9.1 三导体传输线和串扰	367	B.1 矢量分析	559
9.2 无耗传输线的传输线方程	370	B.2 麦克斯韦方程组	564
9.3 单位长度的分布参数	372	B.3 边界条件	577
9.4 感性-容性耦合近似模型	389	B.4 正弦稳定状态	579
9.5 集总参数电路近似模型	407	B.5 功率流	580
9.6 无耗耦合传输线的精确SPICE (PSPICE)模型	411	B.6 均匀平面波	581
9.7 屏蔽导线	424	B.7 静态(DC)电磁场的关系 式——特例	591
9.8 双绞线	441	习题	593
习题	456	参考文献	599
参考文献	463	附录C 用于计算多导体传输线单位 长度参数(PUL)和串扰的 计算机源代码	600
第10章 屏蔽	465	C.1 计算宽间隔导线的PUL参数 矩阵的WIDSEPFOR	600
10.1 屏蔽效能	468	C.2 适用于计算带状电缆的PUL 参数矩阵的RIBBON.FOR	603
10.2 屏蔽效能——远场源	470		
10.3 屏蔽效能——近场源	478		

C.3 适用于计算印制电路板的PUL 参数矩阵的PCB.FOR	605	子电路的SPICELPI.FOR	610
C.4 适用于计算耦合微带线的PUL 参数矩阵的MSTRP.FOR	606	附录D SPICE (PSPICE) 指南 ...	612
C.5 计算耦合连接盘的PUL参数 矩阵的STRPLINE.FOR	607	D.1 产生SPICE或PSPICE程序	613
C.6 适用于计算无耗多导体传输线 的SPICE (PSPICE) 子电路模 型的SPICEMTL.FOR	608	D.2 电路描述	613
C.7 用于计算无耗多导体传输线的 集总参数 π 型SPICE (PSPICE)		D.3 执行语句	616
		D.4 输出语句	617
		D.5 示例	618
		参考文献	621
		索引	622

第1章 电磁兼容 (EMC) 概论

在无线电通信和电报通信的早期,人们就已经知道火花隙能产生谱分量(频谱分量)很丰富的电磁波。这种电磁波能在各种不同的电子和电气设备中产生干扰或噪声,如影响收音机和电话等。很多其他的电磁发射源,如闪电、继电器、直流电动机和荧光灯,也能产生频谱分量丰富的电磁波,并在这些设备中产生干扰。除此之外,也存在窄带电磁发射源。高压电力传输线产生工频(美国为60Hz;欧洲和中国为50Hz)电磁发射,无线电发射机有意发射载波频率上的编码信息(声音、音乐等)。无线电接收机截取这些电磁波,放大后提取包含在电磁波中的信息。雷达发射机也发射单一频率的载波脉冲,当载频脉冲开启和关闭时,这些脉冲就由天线向外辐射,遇到目标后再返回雷达天线。整个电磁波的传输时间直接与目标距雷达天线的距离有关。与无线电传输相比,这种雷达脉冲的谱分量分布在载波周围一个更宽的频带上。另外一个重要且日益显著的电磁发射源与数字计算机和更广义的数字电子设备有关。这些数字设备利用脉冲来表示二进制码——0(关)或1(开)。数字和其他符号则以这些二进制码的不同序列来表示。脉冲从开到关(或相反)的过渡时间是决定脉冲谱分量的最重要因素。过渡时间快(短)的脉冲的频率范围比过渡时间慢(长)的脉冲的频率范围要宽。数字设备的谱分量常常占据很宽的频率范围,也会在电子和电气设备中产生干扰。

1

本书讨论的是这些类型的电磁发射在电子和电气设备中引起干扰的能力。相信大多数读者有过因附近的闪电放电引起调幅(AM)收音机中噪声的经历。闪电放电的频率分量很丰富,有一些会通过收音机的输入滤波器,将噪声叠加到有用信号上。另外,即使收音机没有调谐到特定的发射机频率上,也有可能接收到发射信号,导致无用信号的接收。这些都是在有意接收机中产生干扰的例子。同样重要的是,在无意接收机中产生的干扰。例如,来自调频(FM)广播电台或电视台的强发射有可能被计算机接收到,使计算机认为这是数据或控制信号从而导致计算机出错。反过来,数字计算机有可能产生耦合到电视中的发射,而导致电视信号被干扰。

此外,本书也讨论怎样有效地进行电子系统的设计,以使得电子系统所受的干扰或对外的干扰变得最小,重点针对数字电子系统。一个电子系统如果能与其他电子系统兼容地工作,既不产生干扰也不对外界干扰敏感的话,就称该电子系统与其环境电磁兼容。本书的目的是介绍怎样设计具有电磁兼容(EMC)的电子系统。一个系统如果满足以下三个准则,就认为与其环境电磁兼容:

- (1) 不对其他系统产生干扰;
- (2) 对其他系统的发射不敏感;
- (3) 不对自身产生干扰。

EMC设计不但对设备的性能来说是重要的,而且,设备在全世界各国出售以前还必须满足法定的要求。如果一个电子产品不能投放市场,那么即使它的功能再新、再强

也都是徒劳。

EMC设计技术和方法已经成为数字设计的一部分。因此,本书的内容也将是一名电气工程师必备的基本知识。毫无疑问,随着数字系统时钟速度和数据传输速率的持续提高,这些内容的重要性也将越来越明显。

本书是为大学电气工程专业本科或研究生的EMC课程编写的。目前,市面上也有一些有关EMC的图书,但它们主要是为工程技术人员写的。因此,在每章的最后,我们列出了一系列的参考资料,文中参考处用方括号表示(如[XX])。许多商业杂志、EMC会议论文集和《电气电子工程师协会(IEEE)EMC杂志》中都包含了有关的EMC各方面的指导性文章,我们将分别探讨,并在相应处列出参考资料。成功进行EMC设计的最重要的方面是对电气工程(电路分析、电子学、信号学、电磁学、线性系统理论、数字系统设计等)的基本原理有深入的理解。因此,这里回顾一下这些基本原理,以便于读者能理解这些基本理论,并有效而正确地利用它们来解决EMC问题。有代表性的基本理论图书有参考文献[1~3],有代表性的EMC基本方面的参考文献有[4~13](当然我没有列全)。Ott的著作^[4]是本书的主要参考资料,其他EMC方面的图书和杂志文章将在适当章节中作为参考。有关高速数字系统设计的有代表性的图书是参考文献[14~16];有关EMC课程发展的讨论见参考文献[17, 18]。

1.1 EMC涉及的方面

如上所述,EMC涉及电磁能量的产生、传输和接收。EMC问题的这三个方面构成了EMC设计的基本框架,如图1-1所示。源(也称发射器)产生发射,传输或耦合路径将发射的能量传递到接收器(接收机),发射的能量在接收器被处理,产生所期望的或意外的动作。如果接收到的能量引起接收器以意外的方式动作,这就发生了干扰。电磁能量常常通过无意的耦合模式传递。只有当在接收器输入端接收到的能量有足够的幅度和/或频谱分量而引起接收器以意外的方式动作时,电磁能量的这种无意传递才会造成干扰。电磁能量的无意发射或接收并不一定都有害,接收器的意外动作才构成了干扰。因此,接收器对接收到的能量的处理是干扰是否会产生的一个重要方面。通常很难用推理的方法确定入射到接收器的信号是否会对该接收器造成干扰。例如,在雷达范围内的杂乱回波会使得雷达操作新手不能正确地解释所得到的数据,而对于经验丰富的雷达操作者来说,这种杂乱回波就不会带来问题。在一种情况下造成了干扰而在另一种情况下却又没有造成干扰,尽管有人会争辩说接收器是雷达操作者而不是雷达接收机。这就指出了常常难以唯一地识别如图1-1所示的EMC问题的三个方面。

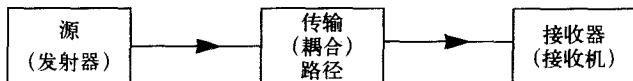


图1-1 EMC耦合问题的基本分解框图

理解源或接收器被分为有意或无意两类也是很重要的。事实上,源或接收器可能同时以两种模式起作用。源或接收器是有意的还是无意的取决于耦合路径和源或接收器的类型。例如,其发射被一台调谐到载波频率的无线电接收机接收到,这台AM无线电台

发射机就构成了有意发射器。另一方面，如果同一台AM无线电台发射机的发射被另一台未调谐到该发射机载波频率的无线电接收机所接收，那么这种发射就是无意的。（实际上发射仍然是有意的，只是耦合路径是无意的。）也有一些发射器，它们的发射并没有任何有用的目的，其中一个例子就是来自荧光灯的（看不见的）电磁发射。

这表明防止干扰有以下三种途径：

- (1) 抑制源的发射；
- (2) 尽可能使耦合路径无效；
- (3) 使接收器对发射不敏感。

当排查EMC问题时，这三点应牢记于心。“第一道防线”是要尽可能抑制源的发射。例如，发现数字脉冲信号的快速（短）上升/下降时间对这些信号的高频谱分量起主要作用。一般地，通过耦合路径传递的信号频率越高，耦合路径越有效。所以，应当减缓（增加）数字信号的上升/下降时间。但是，数字信号的上升/下降时间仅能增加到数字电路将要误动作的那一点。当系统使用1ns上升/下降时间的脉冲能正常工作时，使用具有100ps上升/下降时间的数字信号就没有充分的理由。记住，抑制发射的高频谱分量会从本质上降低耦合路径的有效性，并因此而减小接受器的信号电平。我们将讨论一些减小耦合路径有效性的“蛮方法”。例如，将接收器放入金属盒（屏蔽盒）里有助于减小耦合路径的有效性。但是，屏蔽盒比起减小发射器脉冲的上升/下降时间费用要高，并且，在使用中它们的实际性能经常远差于理想性能。通常，要降低接收器对噪声的敏感性，而同时又要保留产品的有用功能是相当困难的。降低接收器对噪声的敏感性的一个例子就是在数字接收器中使用纠错编码。虽然有意外的电磁能量入射到接收器上，但是纠错编码能让接收器在有潜在的干扰信号存在的情况下依然能正常工作。如果读者能够根据图1-1所示从左到右地降低耦合，通常将会更容易地达到降低耦合的目的，并且系统设计的额外费也会较少。在EMC设计中，使系统达到电磁兼容性而附加成本最小，是一个重要的考虑因素。一个人可以将所有的电子产品放在金属盒里并使用内部电池供电，但是产品的外观、实用性和价格对用户来说可能都是不可接受的。

4

进一步把电磁能量的传递（与防止干扰有关）划分为四类：辐射发射、辐射敏感度、传导发射和传导敏感度，如图1-2所示。一个典型的电子系统通常由一个或多个相互间通过电缆（导线束）通信的子系统构成。为这些子系统供电的方法通常是系统使用安装场所中的交流（电流变化）市电系统。在一个特定的电子系统中，将120V、60Hz的电压（在欧洲为240V、50Hz）变换为给系统内部电子元器件供电所需要的各种直流电压电平。例如，数字逻辑器件需要5V直流电供电，模拟电子器件需要+12V和-12V直流电供电。其他的直流电压为诸如电动机之类的器件供电。有时需要60Hz(50Hz)的交流电为其他元器件供电，如小冷却风扇。60Hz、120V的系统交流电源可以通过一根电线从市电网中获得。还需要其他一些电缆来连接子系统，以使有用的信号能在它们之间传输。所有这些电缆都有潜在的发射和/或接收电磁能量的能力，并且通常在此方面相当有效。一般来说，电缆越长，它发射或接收电磁能量就越有效。在这些电缆上直接传导的干扰信号也可以在子系统间直接传递。如果子系统被金属外壳所包围，那么内部信号或外部信号可在外壳上感应电流，然后这些感应电流向外部环境或者外壳内部辐射。使用非金属外壳，尤其是在低成本系统中变得越来越普遍，通常采用塑料。包含在这些非

金属外壳里的电子电路，大部分完全暴露在电磁辐射中，这样就可能直接向外辐射或者对电磁辐射敏感。如图1-2所示的EMC问题的四个方面：辐射发射、辐射敏感度、传导发射和传导敏感度就反映了这些需要考虑的事项。

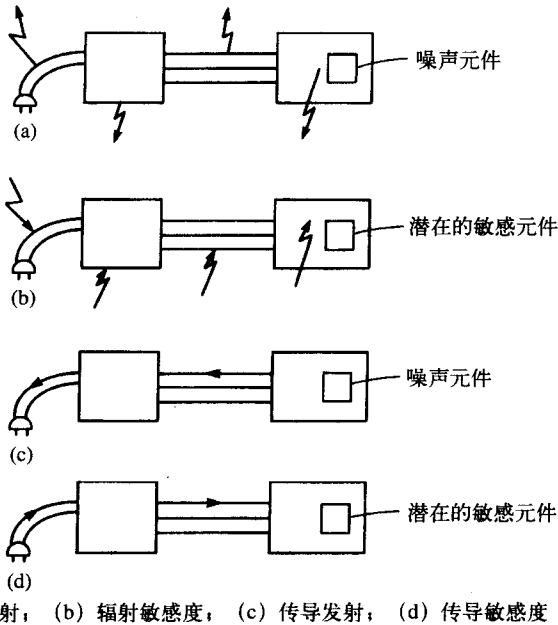


图1-2 四个基本的EMC子问题

电磁辐射可以发生在交流电源线上、装载子系统的金属机壳上、连接子系统的电缆上，或者是非金属封装的电子元件上，如图1-2a所示。这里要指出“电流辐射”的重要性，这是产生辐射发射的（有意或无意的）基本方式，时变电流能有效加速充电，因此产生辐射发射的基本过程就是加速充电。贯穿本书，我们将努力纠正妨碍我们理解此类问题的某些错误认识。例如，交流电源线上仅载有60Hz信号的概念。虽然这根电缆的主要用途就是将60Hz的市电传输到系统中，但是要知道在交流电源线上可能并且常常存在众多其他高频信号。这些信号通过众多耦合途径从内部子系统耦合到交流电源线上，这些耦合途径将在后文中讨论。一旦这些高频电流出现在长电缆（1m或更长）上，电流将非常有效地向外辐射。这根长电缆的作用也可能像一根有效“天线”，可以接收附近其他电子系统的辐射发射，如图1-2b所示。这些外部信号一旦被这根电缆及任何连接子系统的电缆所感应，那么外部信号就会被传入子系统的内部元器件中，并在那些电路中引起干扰。总之，交流电源线、连接电缆、金属机壳或者子系统的内部电路都可能辐射或接收非期望的信号，即使这些结构或电缆并非有意运载这些信号。

电磁能量的发射和对电磁能量的敏感性不仅仅会通过空气中的电磁波传播而发生，也会通过金属导体的直接传导而发生，如图1-2c和图1-2d所示。通常这种耦合路径在本质上比空间耦合路径更有效。电子系统设计者意识到了这一点，所以有意地在此路径上

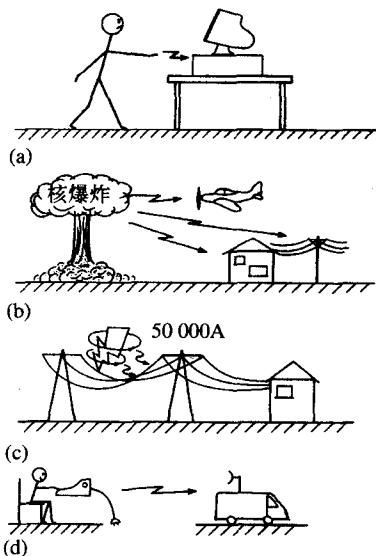
设置障碍，如滤波器，以阻断能量不希望的传播。请注意，干扰问题常常会扩展到图1-2所示的情形之外。例如，在交流电源线上传导的电流进入使用现场的配电网，那么这种电力配电网就是一种直接相连的扩展导线阵列，因此可能非常有效地将这些信号辐射出去。在这种情况下，传导发射又导致了辐射发射。因此，限制交流电源线上的传导发射将有助于降低配电网的辐射发射。

这里主要关注的是电子系统的设计，以使电子设备能够符合政府机构制定的法定要求。但是，我们也将讨论其他很多重要的EMC关注点。其中部分内容如图1-3所示。图1-3a举例说明当前小规模集成电路日益常见的敏感性问题——静电放电（ESD）。穿着橡胶底的鞋走过尼龙地毯会在人体上积聚起静电。这时如果接触电子设备，如键盘，那么静电电荷就可能转移到设备上，在指尖和设备之间产生一个电弧。电荷的直接转移能导致如集成电路芯片等电子元器件永久性的损害。电弧将器件暴露在可被内部电路接收的电磁波中，这将导致系统故障。ESD在今天是一个非常普遍的问题。

在20世纪40年代中期第一颗原子弹爆炸之后，人们发现用来监视爆炸效应的电子系统中的半导体设备（一种新型放大器件）都被破坏了。这不是由于爆炸的直接物理作用，而是由爆炸中电荷的分离和运动所产生的高强度电磁波所造成的，如图1-3b所示。因此，军方对有关“强化”通信和数据处理设备以对抗这种电磁脉冲（EMP）的影响很感兴趣。如果通信和数据处理设备由于EMP而导致失效，那么人们要操心的不是爆炸的物理作用，而是对直接对抗动作的无能为力，这代表了辐射敏感性问题。可以发现用来降低附近电子系统辐射发射影响的同样的原理也可以应用于该问题，但是数量级更大。

闪电频繁发生，如图1-3c所示的直接电击显然很重要。但是，对电子系统的间接作用也具有同等的破坏性。“闪电通道”携带高达50 000A的电流。由这种强电流产生的电磁场可以耦合到电子系统中，既可以通过直接辐射，也可以通过先耦合到市电电力系统，然后经过交流电源线传导进入设备中。因此，设计和测试产品对交流电源线上的瞬变电压的敏感度非常重要。大多数生产商在交流电源线上注入“浪涌”，并使他们设计的产品能经受住这些浪涌和其他非期望的瞬变电压。

防止未经授权者拦截电磁发射也开始被人们所关注。例如，如图1-3d所示，通过监视电磁发射就有可能确定电子打字机上正在打的内容。也有一些其他关于直接截取电磁发射的例子，从电磁发射中可以确定通信的内容或数据。显然，对于军事组织来说，关心被称为TEMPEST的问题是



(a) 静电放电（ESD）；(b) 电磁脉冲（EMP）；(c) 闪电；(d) TEMPEST
（安全的通信和数据处理）

图1-3 EMC的其他方面

必然的。商业团体从保守商业秘密、保护公司市场竞争力这一立场出发,对该问题也十分感兴趣。

在EMC原理范围之内还有很多其他的有关问题。关键在于要懂得根据如图1-2所示的四个基本子问题(辐射发射、辐射敏感度、传导发射和传导敏感度)来看待这些问题,仅仅是问题的背景有所变化。

理解干扰效应的主要工具就是数学模型。数学模型量化了我们对现象的理解,帮助我们得到一些不那么明显的重要性质。此外,数学模型的一个额外的重要优点就是它能辅助设计过程。判断模型是否充分代表了某现象的标准取决于它能否用于预测实验中可观察到的结果。如果模型的预测不能与实验观测的结果相一致,它就毫无用处。但是,限于对模型给出的方程的求解能力和对模型的抽象能力,人们常常用近似条件去构造模型。例如,常用线性近似模型来对非线性现象建模。

经常要进行计算,因此,很有必要纠正一下单位换算。虽然国际科学界倾向于米制的或SI单位系统,但仍需使用其他的单位系统。必须要能够将一个系统中的单位转换为另一个系统中的等效单位,因为方程中有些常数是以另一个单位系统中的单位给出的。一种简单而完美的方法是在两个单位系统间乘上单位变换率,并去掉单位名称,以保证这个量应当是被乘而不是被除,反之亦然。例如,在英制(在美国广泛使用)中距离的单位是英寸(in)¹、英尺(ft)²、英里(mile)³、码(yd)⁴等。一些有代表性的转换式是1in=2.54cm, 1mil=0.001in, 1ft=12in, 1m=100cm, 1mile=5280ft, 1yd=3ft, 等等。例如,假设希望将5mile的距离变换为以km为单位,只需乘上

$$5\text{mile} \times \frac{5280\text{ft}}{1\text{mile}} \times \frac{12\text{in}}{1\text{ft}} \times \frac{2.54\text{cm}}{1\text{in}} \times \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \times \frac{1\text{km}}{1000\text{m}} = 8.047$$

在变换中消去了单位名称,可避免应当使用除法(乘法)时使用了不恰当的单位比率的乘法(除法)。不能正确变换单位是导致数值误差的首要原因。

复习题1.1 转换下列量的单位:(1) 10ft变换成以m为单位的量;(2) 50cm变换成以in为单位的量;(3) 30km变换成以mile为单位的量。

答案: (1) 3.048m; (2) 19.685in; (3) 18.64mile。

对用计算器做的计算结果一定再“心算”检验一下,例如,10cm近似为4in(3.94in)。

1.2 EMC历史

或许有人会说干扰及其抑制早在19世纪后期马可尼的第一个火花隙实验就已经提出来了。1901年,他使用铜线阵列实现了首次跨大西洋的电波发射。那时唯一重要的接收器就是无线电接收机,数量极少且相距甚远,所以干扰问题的修正相对比较简单。关于无线电干扰的技术文章大约是在1920年左右在各种技术杂志上陆续出现的。那时的无线电接收机和天线相当粗糙,易受外部干扰源或内部干扰源(如自激振荡)的干扰。

1. 1in=0.0254m。——编者注

2. 1ft=0.3048m。——编者注

3. 1mile=1609.344m。——编者注

4. 1yd=0.9144m。——编者注

设计技术的提高消除了很多此类问题。来自电气设备（如电动机、电气化铁路和信号灯）的无线电干扰，在1930年左右迅速出现并成为主要问题。

在第二次世界大战期间，电子设备尤其是无线电收发设备、导航设备和雷达的使用不断增加，飞行器上的无线电收发设备和导航设备之间干扰的例子也开始增多。通常，通过在并不拥挤的频谱上重新分配发射频率，或将电缆远离噪声发射源以避免电缆接收那些发射，就可以很容易地解决干扰问题。由于电子器件的密度（主要是真空电子管）远小于今天，为了解决电磁干扰（EMI）问题，用逐个排查的办法很容易实现干扰的修正。但是，随着高密度电子元器件的发明，如20世纪50年代发明的场效应晶体管、60年代发明的集成电路（IC）和70年代发明的微处理器芯片，干扰问题显著增加。由于语音和数据传输需求的增加，频谱也变得越来越拥挤，这就要求对频谱的利用进行合理规划，这些工作一直延续到今天。

10

将目前这种对EMC的关注带到最前沿的主要事件或许是数字信号处理和计算的引入。在20世纪60年代早期，数字计算机采用电子管作为开关元件。它们的速度相当慢（按照现在的标准），所需的耗电量大，占地面积大。在20世纪70年代集成电路进入了计算机的构造，使其耗电量小了很多，需要的物理空间也小了很多。到了70年代末期，用数字信号处理代替模拟信号处理的趋势开始加速。由于开关速度的提高和IC的小型化，几乎所有的电子功能都以数字化实现。从计算到字处理再到数字控制，以数字化实现各种不同功能变得非常普遍，持续至今。这意味着富含频谱分量（开关波形）的噪声源的密度开始变得相当大。因此，EMI问题的出现开始增加了。

随着干扰有线通信和无线通信的数字系统日益增多，1979年美国联邦通信委员会（FCC）颁布了一个规范，要求所有“数字设备”的电磁发射必须低于某个限值。颁布这一规范的目的是要限制对环境的“电磁污染”，以防止或至少减少EMI案例的数量。“数字设备”除非电磁发射满足FCC强制的限值，否则不能在美国销售，由此激发了从数字计算机到电子打字机的民用电子产品生产商对EMC学科的浓厚兴趣。

我并未暗指美国处在制订电磁发射限值的“净化电磁环境”的最前沿。许多欧洲国家早在FCC颁布其规范之前就已经对数字设备强制实施了类似的要求。1933年，国际电工技术委员会（IEC）在巴黎的一次会议上建议成立国际无线电干扰特别委员会（CISPR）来处理不断出现的EMI问题。该委员会起草了一份文件详细说明用于确定潜在EMI发射的测量设备。CISPR在二战结束后，于1946年在伦敦重新召开会议。随后的多次会议形成了各种技术出版物，讨论测量技术并建议发射限值。一些欧洲国家采用了CISPR建议限值的不同版本。FCC规范为美国第一个针对数字系统的规范，限值参照了CISPR推荐物而又根据美国的环境有所改动。为了防止与EMI相关的“场问题”，美国的大多数电子产品生产商已经对他们的产品设定了内部限值和标准。但是，FCC规范使得这样一种自愿行为变成了法定的程序要求。

美国军方在FCC颁布其规范之前也通过MIL-STD-461强制规定了电子系统的电磁发射限值，以防止出现EMI问题。该标准从20世纪60年代早期开始生效，实施这一标准以保证“军事任务的成功”。从手持式电钻到复杂的电子计算机，所有的电子和电气设备都被要求满足这些标准的发射限值。军用标准的另一方面是设定了敏感度要求。将干扰信号有意注入设备，要求设备在有这些干扰信号存在时必须能正常工作。即使一个电子