



普通高等教育
电气工程与自动化类
规划教材

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY
PRINCIPLES AND APPLICATIONS

电磁兼容原理及应用

熊蕊等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类规划教材

电磁兼容原理及应用

熊蕊等 编著



机械工业出版社

本书介绍了电磁兼容基本知识,以电力电子电路和系统为重点,介绍了随着电力电子技术飞速发展而日益突显的电磁兼容问题、相关理论和研究设计方法,以及电气工程领域中有关电磁兼容问题,作为电气工程学科的学生研究本学科电磁兼容问题的入门指导。

全书共8章,内容包括电磁兼容的基本概念、抑制电磁干扰的基础理论和方法、电磁兼容试验(电磁干扰测量)技术、电力电子电路与系统的电磁兼容设计、电气工程领域中的电磁兼容问题、电磁兼容标准等。每章后附有思考题和习题,由浅入深地引导学生认识和思考电磁兼容问题,提出解决方案。

本书可作为电气工程及相关学科的高年级本科生、研究生的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理及应用/熊蕊编著. —北京:机械工业出版社,2012.11
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-111-39977-3

I. ①电… II. ①熊… III. ①电磁兼容性-高等学校-教材
IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第235835号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:王洪流 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·371千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39977-3

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同层次、不同类型的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、

资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈万时 郑大钟

前 言

电力与电子产品及系统的电磁兼容 (EMC) 研究, 伴随技术飞速发展与应用, 从一种工程技术发展成为一门工程科学。以往处理 EMC 和产品安全设计的问题往往是在产品设计环节的后期, 因此容易被大学的工程教育忽视, 也导致了工程教育与实际产品研发到应用之间的距离加大。产品设计、研发与相关的产品认证之间的巨大矛盾, 正在削弱工业国家的创新实力。

为工程专业的学生提供 EMC 方面的教育及产品安全的研究, 使其具备在 EMC 工程领域工作的基础知识, 日益成为国内外高校工程教育领域的共识。从理论和实践应用上理解 EMC 原理, 非常适合于现有的电气工程相关专业, 因为在电气工程课程里已有 EMC 课程所要求的先修课程。EMC 课程与电气工程中其他课程内容不同的是, 其他课程的教材内容在讲解时已经成熟, 有固定应用模式。而 EMC 问题是随新技术和应用而不断出现的, 每一项 EMC 技术在某一场合应用成功而在另一场合可能失败。引导学生学会观察、分析, 最终具有解决 EMC 问题的能力, 才是本课程教学的目的。

针对电气工程的多学科方向性和强大的工程需求, 同时考虑到绝大多数本科生和研究生在校期间不一定接触到相应的 EMC 问题, 不易掌握分析 EMC 的方法, 本书力图按照学生对科学的自然认知程度, 从 EMC 现象到基本电磁分析原理进行介绍, 再通过材料、器件、电路、系统等 EMC 分析基础的介绍, 逐步过渡, 最后归纳性分类介绍 EMC 技术。本书后半部分介绍的一系列案例, 目的是由浅入深地逐步引导学生观察、思考 EMC 问题。这些案例或是最新国外 EMC 文献中的典型分析, 或是近年来 EMC 研究的最新成果, 引导学生分析这些技术的适用场合, 使其了解迄今为止尚无法解决哪些 EMC 问题, 思考解决 EMC 问题的可能途径。从本人多年的教学中发现, 学生非常喜欢这样的案例, 这些案例比生涩的公式更能让他们直观地了解什么是 EMC。

在每章后面的习题与思考题中, 本书以引导学生观察和思考为主, 让学生逐步关注 EMC 问题, 逐步学会自行分析某一产品或系统 (可能是自行设计研发的) 的电磁兼容性、可能潜在的问题, 给出解决的建议, 或问题已经解决后的分析与结论。笔者以为这也是工程教育需要且关键的环节, 而不仅仅是为了了解 EMC 知识。

本书作为 EMC 入门的教材, 仅是对电气工程中所涉及到的 EMC 内容和原理做了简要介绍, 补充了很多新技术、新产品的潜在 EMC 问题与案例分析, 而并未将很深的专业内容纳入。因 EMC 应用领域极广, 理论博大精深, 现在还处于发展中, 故本书力图引导学生将视野逐渐延伸到毕业后的应用, 以求达到大学中的课程主要知识学习与能力培养目标, 今后若从事 EMC 领域研究工作, 则可自行补充学习相关专业书籍。

本书第 1~7 章由熊蕊撰写, 第 8 章由黄劲撰写。教材中所有内容都是在前人研究的基础上, 对各种文献资料进行总结提炼后完成的, 有些源于已知文献, 有的则无法在书后的文献资料中一一列举, 它们源于在过去十多年间本人参加的各种研讨会, 以及与本人的研究团队成员所经历的无数次讨论、实验中受益的思想, 还有华中科技大学的黄劲博士、张蓉博

士，以及王志、李勍楠、刘静、李扶中等硕士的贡献。在此对所引用文献的作者和那些无法列举资源的提供者，表示诚挚的谢意，因为他们，本教材才得以问世。

本书主要面向电气工程相关专业的本科生或硕士研究生，作为其入门教材。

鉴于笔者水平有限，本书的不足和错误之处在所难免，恳请读者在使用过程中予以指正。

熊蕊

2012 年于华中科技大学

目 录

序

前言

第 1 章 电磁环境与电磁兼容..... 1

1.1 引言 1

1.2 电磁兼容的基本概念 5

1.2.1 电磁兼容 5

1.2.2 电磁兼容技术的发展 6

1.3 电磁干扰和电磁兼容有关术语 8

1.3.1 噪声和干扰 8

1.3.2 电磁干扰三要素 8

1.3.3 电磁兼容常见名词术语 9

1.4 电磁噪声和干扰常用描述方式 11

1.5 电磁兼容研究的主要内容 15

1.5.1 电磁环境评估 15

1.5.2 电磁兼容标准研究 16

1.5.3 电磁干扰的研究 16

1.5.4 电磁干扰测试的研究 17

1.5.5 电磁兼容设计方法和控制技术 研究 17

1.5.6 其他研究内容 19

思考题和习题 20

第 2 章 电磁干扰种类、形成及传播 方式 21

2.1 电磁干扰的种类及形成 21

2.1.1 自然电磁干扰和人为电磁干扰 21

2.1.2 辐射干扰和传导干扰 27

2.1.3 差模干扰和共模干扰 33

2.1.4 电磁干扰的其他分类 35

2.2 电磁干扰的传播方式——耦合 37

2.2.1 直接耦合 38

2.2.2 漏电耦合 38

2.2.3 公共阻抗耦合 38

2.2.4 电容性耦合 39

2.2.5 电磁感应耦合 40

2.2.6 辐射耦合 40

思考题和习题 41

第 3 章 电磁干扰的抑制 42

3.1 抑制电磁干扰的常用措施 42

3.1.1 接地 42

3.1.2 屏蔽 48

3.1.3 滤波 53

3.1.4 其他技术措施 55

3.2 常用的抗干扰元器件 56

3.2.1 电容器 56

3.2.2 电感器 60

3.2.3 电阻器 62

3.2.4 滤波器 63

3.2.5 浪涌吸收器 76

3.2.6 连接器 79

3.3 噪声补偿技术 82

3.3.1 噪声补偿原理 83

3.3.2 有源噪声补偿技术 86

3.3.3 无源噪声补偿技术 88

思考题和习题 92

第 4 章 电磁干扰试验和测量技术 简介 93

4.1 干扰测量的一般问题 93

4.1.1 干扰的表示方式 93

4.1.2 干扰的测量方式和仪器 94

4.1.3 测量的一般要求 97

4.2 干扰的测量 105

4.2.1 传导干扰测量 105

4.2.2 传导敏感度测量 105

4.2.3 辐射干扰测量 105

4.2.4 辐射敏感度测量 105

4.2.5 静电放电敏感度测量 106

4.2.6 脉冲干扰敏感度测量 106

4.3 组建简易电磁兼容实验室的方法 107

4.3.1 传导发射测试 108

4.3.2 辐射发射测试 109

4.3.3 谐波测试与闪烁测试 109

4.3.4 静电放电抗扰度测试 109

4.3.5 辐射电磁场抗扰度测试 110

4.3.6 传导干扰抗扰度测试 110

4.3.7 其他抗扰度测试	110	对策	173
4.3.8 如何自制近场测试设备	111	6.4 电力电子电路结构导致的 EMI 问 题	180
思考题和习题	113	6.4.1 三相电动机交流传动系统的共 模噪声和轴电流问题	180
第 5 章 电子电路系统中的 EMC 设 计	114	6.4.2 三相三桥臂逆变器-电动机传 动系统共模噪声的由来	182
5.1 电子产品 EMC 研究方法简介	114	6.4.3 降低三相逆变器-电动机传动系 统共模噪声的方法	183
5.1.1 电磁兼容预测中的有关理论和 主要研究方法简介	114	6.5 电力电子电路中 EMI 噪声的简单 排查	191
5.1.2 电力电子电路与系统的 EMC 研究方法	116	6.5.1 电力电子电路常见噪声、对应 成因与解决方案归纳	191
5.1.3 实际电力电子装置电磁兼容预 测和建模中的问题和对策	121	6.5.2 电力电子设备 EMC 问题与解决 方案(案例一则)	191
5.2 电子产品常见 EMC 问题分析及对 策	126	6.6 电力电子电路与系统的 EMI 抑制技 术的概况总结	196
5.2.1 模拟电路中的 EMC 问题	126	6.6.1 由抑制的噪声种类对 EMC 技术 进行分类	197
5.2.2 数字电路中的 EMC 问题	128	6.6.2 根据 EMC 技术特点分类	197
5.3 PCB 的 EMC 问题及设计	133	思考题和习题	198
5.3.1 PCB 上的噪声及由来	134	第 7 章 电气工程领域中的其他 EMC 问题	199
5.3.2 PCB 上噪声的抑制	139	7.1 电力系统与高压输电线路中的 EMC 问题	199
5.3.3 串扰及其抑制	153	7.1.1 电力系统中的 EMC 问题	199
5.4 嵌入式系统中的 EMC 设计问题	156	7.1.2 高压输电线路及 EMC 问题	201
5.4.1 嵌入式系统	156	7.2 电力牵引系统 EMC 问题	202
5.4.2 嵌入式系统提高电磁兼容的措 施	156	7.3 电动车 EMC 问题	203
思考题和习题	162	7.4 光伏系统——太阳能逆变器 EMC 问题	204
第 6 章 电力电子电路与系统的 EMC 问题及对策	163	7.4.1 由于提高效率和降低成本需求 而产生的高 dv/dt 和 di/dt	204
6.1 整流电路和非线性负载产生的低频 谐波	163	7.4.2 微逆变器的潜在干扰问题	205
6.1.1 谐波问题	163	7.5 医疗仪器设备及系统的 EMC 问题	206
6.1.2 谐波和功率因数的概念	164	7.5.1 电磁干扰对医疗仪器设备的影 响	206
6.1.3 抑制低频谐波的对策	165	7.5.2 干扰医疗仪器设备正常工作的 噪声类型	206
6.2 SPWM 逆变器输出中的谐波	169	7.5.3 医疗仪器设备内部使用供电电 源的情况与影响	207
6.2.1 SPWM 方式产生的正弦信号导 致的谐波	169	7.5.4 医疗仪器设备常用的抑制电磁 干扰方法	207
6.2.2 数字式 SPWM 算法造成的正弦 波误差和谐波	170		
6.2.3 SPWM 中谐波的抑制	171		
6.3 高开关频率导致的电压和电流尖峰 及其对策	172		
6.3.1 高频电压和电流尖峰的成因	172		
6.3.2 抑制电压尖峰和电流尖峰的			

7.6 建筑电气设计中的 EMC 问题	210	8.2 电磁兼容的标准化组织	219
7.7 电磁脉冲与军事应用中的 EMC 问题	211	8.2.1 国际电工委员会 (IEC)	219
7.7.1 电磁脉冲的产生与特性	211	8.2.2 国际电信联盟 (ITU)	220
7.7.2 电磁脉冲的破坏效应与影响	211	8.2.3 欧美标准组织	220
7.8 复杂电磁环境下电磁兼容问题的诊断与解决	213	8.2.4 中国标准组织	220
7.8.1 电磁干扰问题诊断	214	8.3 电磁兼容的标准	221
7.8.2 电磁干扰问题排查与解决步骤	214	8.3.1 EMC 标准的体系	221
7.9 电磁兼容未来研究展望	216	8.3.2 EMC 标准的内容	222
思考题和习题	217	8.3.3 我国现行的 EMC 标准	222
第 8 章 电磁兼容标准简介	218	思考题和习题	228
8.1 引言	218	参考文献	229

第1章 电磁环境与电磁兼容

1.1 引言

利用电能进行工作的各种电气和电子设备，与设备的供电电源、设备的负载、周围的其他电气或电子设备、设备操作者或设备为之提供服务的人、甚至其他有生命的物质等一起，形成了特定的工作环境。电气、电子设备在运行中大都会经历电磁能量转换的过程，而电磁能量转换过程往往会对周围环境中的其他用电设备、人或生物产生影响。同时，运行中的电气电子设备，也会由于其他设备工作时产生电磁能量转换而受到电磁干扰。

从地球表面到人造卫星活动的近千公里空间内处处存在着电磁波。电能和磁能无时无刻不在影响着人们的生活及生产。电磁能的广泛应用，使工业技术的发展日新月异，但它在为人类创造巨大财富的同时，也给人类活动带来一定的危害，这就是电磁污染或电磁干扰。研究电磁污染是当今环境保护中的重要分支。

电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）源于电磁骚扰（Electromagnetic Disturbance, EMD），二者既有一定的联系，也有区别，这从它们的具体定义可以了解。电磁骚扰指任何可能引起装置、设备或系统性能下降，或对有生命或无生命物质产生作用的电磁现象；而电磁干扰则指电磁骚扰引起的设备、传输通道或性能的下降，即电磁骚扰引起的后果。

结构和工作原理比较简单的早期的电气控制设备大都是强电设备，它们运行时常对无线电、通信等弱电设备产生干扰，而自身却很少受到所处电磁环境的影响；或者虽然受到某种程度的电磁干扰，但大多不会造成严重后果。

20世纪50年代开始，随着自动化技术和电力电子器件的快速发展，电力电子技术的兴起和微电子技术发展迅速向电气设备领域渗透，形成电气设备和电子设备结合、强电和弱电结合、机械和电气结合、仪表和装置结合、硬件和软件结合的各种复杂控制系统，而且在结构上也往往融为一体，同一电网中的用电设备越来越多，电磁环境和电磁干扰问题也日趋复杂和严重。

除了电气电子设备在运行时由于发生电磁能量转换过程可以产生电磁干扰现象外，自然现象中也有产生电磁干扰的情况。例如：静电放电、闪电等现象产生的电子扰动也会引起电子设备的非正常响应，雷电产生的强大电流甚至影响建筑和人的安全。

电磁干扰的范围很大，从探测不到的微弱干扰到高强度干扰，大体可以分为三种^[3]：轻微干扰、中等强度干扰和灾难性干扰。例如：电动剃须刀或食物搅拌器对收音机或电视机产生的干扰属轻微干扰，这种干扰通常仅持续几分钟，并且无破坏性作用；而雷达辐射的电波可能引爆航空母舰上的武器弹药，来自指挥塔上无线电信息受到干扰会造成机毁人亡的严重后果，这些干扰是灾难性的。但是大多数电磁干扰介乎二者之间，属于中等强度干扰，如便携式发射机的辐射会对计算机形成干扰，静电放电会对点钞机或银行终端形成干扰，闪电会对自动控制测试设备或工业过程产生干扰，等等。

电磁干扰有两种，一种是自然干扰，它来源于地球和宇宙中的自然电磁现象。例如：

宇宙干扰——来自太阳、月亮、木星等发射的无线电噪声；

雷电干扰——由夏季本地雷电和冬季热带地区雷电放电所产生，是一连串的干扰脉冲，其电磁发射借助电离层的传输可以传播到几千公里以外的地方；

大气干扰——除雷电放电外，大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹等微粒在高速通过飞机、飞船表面时，由于相对摩擦运动而产生电荷迁移从而积沉静电，当电动势升高到 1MV 时，会产生火花放电、电晕放电，影响到高频、甚高频频段的无线电通信和导航。

热噪声——处于一定热力学状态下的导体中所产生的无规则电起伏，由导体中自由电子的无规则运动引起，如电阻热噪声、气体放电噪声、有源器件的散弹噪声。

第二类干扰是人为干扰，来自于有意发射干扰源和无意发射干扰源：

有意发射干扰源——专用于辐射电磁能的设备，如广播、电视、通信、雷达、导航等发射设备，通过向空间发射有用信号的电磁能量来工作，而对于不需要这些信号的电子设备或系统将构成干扰；

无意发射干扰源——发射电磁能力不是其工作的主要目的，如汽车的点火系统、各种不同的用电装置、电力电子装置、电机传动系统、照明装置、高压电力线、科学和医用设备、静电放电、核爆炸电磁脉冲等。

图 1-1 显示了我们生活环境中存在的各类电磁干扰（当然，这只是引起电磁环境日趋恶劣的一部分原因）。位于图 1-1 中央的接收机通过电磁场和电路方式接收到来自：电力传输线强大电流和高压形成的电场而导致的干扰；雷电瞬间强大的电磁干扰脉冲；雷达和电视台发射出的电磁波；移动电台（包括手机信号）产生的电磁波信号；汽车等机动车辆的点火系统（还有马达、发电机、风扇、风档刮水器等）由于向外发射电磁能量而形成的干扰；电机运行时产生的干扰；由于与接收机共用电源而形成的传导干扰。这里，接收机作为某一固定用途的接收信号的装置，如接收雷达信号的接收器，因此其接收到非雷达信号的其他信号就对其形成干扰，如果雷达信号与其他干扰信号相比不是很强，那么该接收机就不能正常

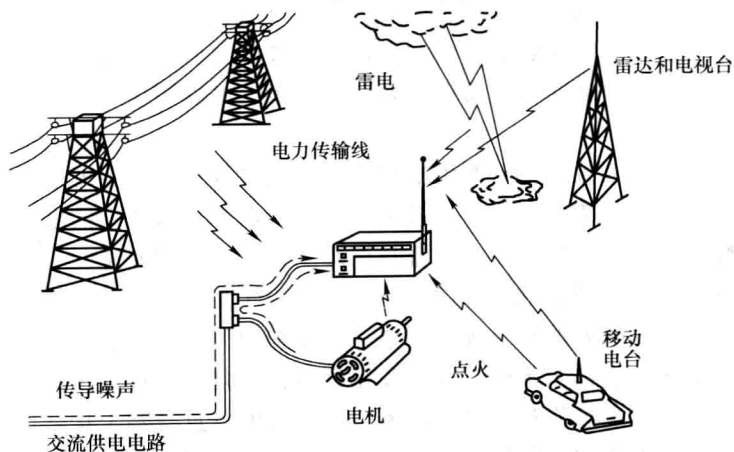


图 1-1 具有多重电磁干扰的生活环境

工作。如果这个接收装置是生活在该环境下的人类，这些构成干扰的信号对人类正常健康的生活可能会产生不利的影响。

军事上，电磁环境的这一复杂特性又可以被利用来形成对敌方的干扰，如人为地制造特殊信号对敌方的雷达信号实施干扰。

电子设备发射出来的电磁干扰具有一定的危害性，主要表现在以下四个方面：

1) 电磁干扰会降低电子元件的工作寿命，强度较大的电磁干扰可以击穿电子设备，导致元件及整个系统的损坏。例如，据美国哥伦比亚广播公司2003年3月26日报道，2003年伊拉克战争中，美国军队第一次在伊拉克使用了最新版本的“微波电子炸弹”。其工作原理是：依靠高功率电磁波产生的高温、电离、辐射等综合效应，在目标内部的电子线路中产生致命的电压和电流，击穿或烧毁其中的敏感元器件，毁损电脑中存储的数据，从而使对方的武器和指挥系统陷于瘫痪，丧失战斗力。轰炸的结果使得伊拉克电视台转播信号被迫中断。此外，美国有统计表明，由于静电导致计算机及其元器件的损坏造成的经济损失每年高达数亿美元。静电放电可以损坏医院里病人的导管泵而导致病人生命危险。

2) 电磁干扰会影响电子系统的信号，使其信噪比降低，影响系统的正常工作。电子系统在电磁干扰的作用下，由于信号精度降低、遗失、错误，使得系统工作异常甚至拒绝动作。这种情况在有用信号微弱时尤为严重。移动电话信号可以使仪表显示错误，甚至可以造成核电站运转失灵；水管中地电流产生的磁场，使医院里高灵敏度电子仪表屡受影响，曾经在一次手术中，一台塑料焊接机对病人的监控系统产生了干扰，致使该监控系统没有检测到病人手臂中的血液循环停止，最终导致病人的手臂只能切除。

3) 对信息安全与信息保密构成严重威胁。对于由数字电路组成的信息传输与处理设备来说，由于辐射频谱及谐波非常丰富，因而很容易被截获和破译。

4) 电磁辐射还会引起人体细胞的生物效应，出现头晕、乏力、记忆力减退等现象，严重时会导致人体慢性病变，如现在经常讨论的手机辐射与人体健康以及微波基站困扰居民生活区等问题。

图1-2给出了各类电磁干扰噪声的传播途径。图中的术语将在下一节中给予解释。

几乎所有的电气、电子设备工作时对周围环境产生干扰影响。我们将这种环境称为电磁环境——存在于给定场所的所有电磁现象的总和。

伴随国民经济和社会信息化的发展，大量电子和电气产品被广泛应用于人们的生产和生活中。随着自动化程度越来越高，人们越来越依赖电气电子设备，科学家和工程师们一直朝一个共同的目标而努力奋斗——研究、探索直至打造新一代经济而卓越的电气与电子产品。然而，由电子和电气产品带来的电磁干扰问题，越来越严重地影响到人们的健康、妨碍了产品间的正常运行，随之带来的电磁干扰使得人类和设备本身依赖的这个电磁环境越来越恶劣。不论怎么精心策划，设计中的缺陷始终像噩梦般挥之不去，补救的“药方”就是电磁兼容技术——确保设备或系统不产生电磁干扰的技术。着力解决电磁干扰问题已成为电气和信息化建设中的重要内容之一。

电磁干扰现象不仅存在于电气电子设备中，而且明显影响了系统各设备间兼容地工作。强弱电结合的集成度高、设备密度高是目前自动化系统突出的特征，如电力系统中，在电网容量增大、输电电压增高的同时，以计算机和微处理器为基础的继电保护、电网控制、通信设备得到广泛应用。因此，电力系统电磁兼容问题也变得十分突出。例如，集继电保护、通

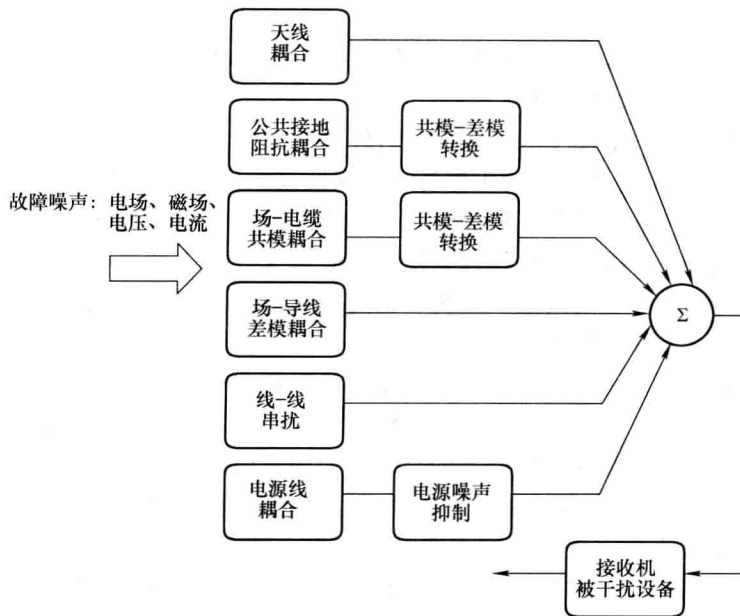


图 1-2 电磁干扰从干扰源经耦合通道到接收机的流程

信、SCADA 功能于一体的变电站综合自动化设备，通常安装在变电站高压设备的附近，该设备能正常工作的先决条件，就是它能够承受变电站中正常操作或事故情况下极强的电磁干扰。此外，由于现代的高压开关常常与电子控制和保护设备集成于一体，因此，对这种强电与弱电设备组合的设备不仅需要进行高电压、大电流的试验，同时还要通过电磁兼容的试验。GIS（Gas Insulated Substation，气体绝缘介质开关设备）的隔离开关操作时，可以产生频率高达数兆赫的快速暂态过电压。这种快速暂态过电压不仅会危及变压器等设备的绝缘，而且会通过接地网向外传播，干扰变电站继电保护、控制设备的正常工作。随着电力系统自动化水平的提高，电磁兼容技术的重要性日益显现出来。

为了适应加入世界贸易组织的需要，我国自 2001 年 12 月开始颁布强制性产品认证制度，并于 2003 年 5 月起执行。第一批强制性产品目录共涉及 9 个行业，19 大类共 132 种产品。其中，除少数明显与电子技术无关外（如机动车辆轮胎、安全玻璃和乳胶产品等），多数都有电气安全问题，有相当多的产品涉及电磁兼容问题。

我国加入 WTO 后，与关税壁垒相比，电磁兼容的技术壁垒成为我国电子产品出口更大的障碍。要冲破这种壁垒，就需要学习和借鉴国外先进技术和经验，掌握电磁兼容技术，培养自己的技术人才。

由此可见，作为电气工程师，不仅要掌握电气设计知识和技术，还要了解和掌握电磁兼容原理和技术，才能使自己设计的产品、设备或系统正常工作，并且不对其他电气设备造成影响，若不满足电磁兼容要求，设计出来的仅是一堆废品而已。国家标准化法规定：“强制性标准必须执行，不符合强制性标准的产品，禁止生产、销售和进口”。

1.2 电磁兼容的基本概念

1.2.1 电磁兼容

“兼容”即“兼顾”或“容忍”，但电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）并非指电与磁之间的兼容，电与磁是不可分割，相互共存的一种物理现象、物理环境。

上一节中，我们已经知道了电磁能量转换是许多电气电子设备的基本工作原理之一，要做到这些设备或系统完全不产生电磁干扰是不可能的。但是设备在同一电磁环境下能“兼容”地工作却是可以达到的目标。因此“电磁兼容”就是在这样的情况下提出来的——干扰可以在不损坏信息的前提下与有用信号共存。

电磁兼容意味着：在不损害信号所含信息的条件下，信号和干扰能够共存。设备或系统在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态。国家标准 GB/T4765-1995《电磁兼容术语》对“电磁兼容”做了确切定义：设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

电磁兼容的定义中包含着两层意义：一是设备要有一定的抗电磁干扰能力，使其在电磁环境中能正常工作；二是设备工作中自身产生的电磁骚扰应抑制在一定水平下，不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰。这里指的“任何事物”，除了同一电磁环境下的其他设备和系统外，还包括生活在同一环境下的人、动物和植物。因而电气与电子产品的电磁兼容除了保证产品本身的可靠性外，还对保护生态环境和安全起到积极作用。

电磁兼容是一种能力的表现，即自身抗干扰能力和抑制自身产生干扰的能力。能力的提高与产品或系统的功能和性能的提高一样，需要完成理论上探索、设计、工程实现、试验、纠错完善再提高、再试验（测试）等一系列工作，因而在这样一系列工作过程中，形成了一门学科分支——电磁兼容学。研究电磁兼容的目的是为了保证电器组件或装置在电磁环境中能够具有正常工作的能力，以及研究电磁波对社会生产活动和人体健康造成危害的机理和预防措施。

以电子产品的设计为例：早期的电气和电子设备在研制初期往往没有进行严格的 EMC 设计，往往是按照功能设计研制出来后才进行 EMC 的测试和补救，因此，很多电气和电子设备是经过多次修改才基本通过 EMC 测试的。这必然要造成人力、物力上的浪费，同时由于功能设计时没有严格考虑 EMC 问题，使补救措施在装置结构固定后往往难以实现。因此 EMC 设计在装置设计时与功能设计同等重要，应同时进行。

但是，EMC 设计与常规的电路设计有着根本的不同。电子电路通常用电路图来描述，不论是信号处理还是功率处理，电路图是仅着眼于原定目的传输信号（或功率）而把电路抽象化的模型。从 EMI 的观点来看，电路图几乎什么也没有描述，因为电路图在抽象化的过程中舍弃了寄生参数、元器件之间的相互耦合以及这些参数和耦合对实际电路的影响。因此电路设计（电子设备的功能设计）有较准确的电路模型、数学模型和设计模式（理论计算公式、依据）。而 EMC 设计除了要考虑干扰源以外，尚要考虑耦合及耦合路径以及敏感器的问题，这些问题难以用准确的电路模型去描述，更难以用精确的数学模型去定量分析、计算和仿真，因此目前许多装置在验证初期要依据 EMC 理论进行 EMC 设计，但它可能

仅为指导性的，最终由于一些难以估计的因素，设计出的电气电子装置必须依靠测试来确定（而不是完全依靠设计所赋予）其 EMC 性能。

电磁兼容学是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下，各种电气电子设备或系统（广义的还应包括生物体）可以共存，并不致引起性能降级的一门科学。其基础理论涉及数学、电磁场理论、电路基础、信号分析等学科与技术；其应用范围几乎涉及到所有的用电领域。由于其理论基础宽、涉及面广、物理现象复杂，在电磁兼容学中，观察和判断并解决问题的一个主要途径是试验和测量。迄今为止，对于最后解决问题的成功验证，没有任何一个领域像电磁兼容那样强烈地依赖于测量，因此，电磁兼容学是理论性强、涉及面广、工程实践性强、测量方法系统的综合性科学。

1.2.2 电磁兼容技术的发展

电磁兼容是通过控制电磁干扰的一系列技术来实现的，因此电磁兼容学也是在认识电磁干扰、研究电磁干扰、对抗电磁干扰和管理电磁干扰的工程中发展起来的。

电磁干扰是一个人们早已认识到的古老问题。最早出现的电磁干扰现象是单线电报间的串扰。早在 1881 年英国科学家希维塞德就发表了《论干扰》，拉开了研究电磁干扰的序幕，但这类干扰现象在当时并未引起重视。随着电气运输的出现，在一根通信线与不对称的强电线之间有较长的平行运行，干扰问题显得非常严重而且日趋恶化，因此 1887 年柏林电气协会成立了研究干扰问题的委员会，成员有赫姆霍尔兹和西门子等。紧接着英国邮电部门在 1889 年研究了通信干扰问题。美国《电世界》杂志也开始登载电磁感应方面的文章。20 世纪初期索末菲在这方面进行了著名而有成效的研究。此后人们对电磁感应影响的研究日益深入，其中波拉切克、卡尔生、哈波兰德、尚德、克留威、柯列、韦特、柯斯琴科、米哈依洛夫、拉茹莫夫等学者的工作都很突出。直至今日，此类干扰问题仍为国际电信联盟（ITU）第五研究组及第六研究组在各研究期的主要研究课题。

除了耦合方式引起的干扰外，人们还对辐射性干扰进行了大量研究。虽然在早期这些工作进行得还比较零散，但以后逐步走向正轨，各国陆续建立起相关的科研机构。在美国早已出版有关射频干扰的专门刊物《Radio Frequency Interference》，报道了不少科研成果。直至 1964 年，该专刊业务范围不断扩大，改名为 EMC 专刊，并沿用至今。前苏联在 1984 年即已制订了《工业无线电干扰的极限容许值标准》并颁布施行（1954 年曾进行了一次修改），有很多研究单位从事抗干扰的研究。其他国家也相继加强了射频干扰的研究工作，涌现出在干扰研究方面有较大贡献的大批学者。目前国际上除 EMC 专业学会外，还有国际无线电干扰特别委员会（CISPR）等组织从事与 EMC 有关的高频干扰课题的研究。

随着电磁辐射、电磁波传播和现代电气电子设备及技术的发展，干扰现象促使电磁干扰抑制的研究也在进一步发展。但是，电磁兼容这门新的学科却是近代形成的。人们从对干扰问题的长期研究中，探索到干扰产生的原因、干扰性质、干扰的物理模型，逐渐完善了电磁干扰传输及耦合的计算方法，提出了一系列抑制干扰的技术措施，并提出了一系列测试验证电气电子设备可以兼容工作的测试方法，建立了电磁兼容的各种组织、标准和规范，解决了电磁兼容分析、预测、设计、管理、测量等方面一系列理论和技术问题。

20 世纪 40 年代初，电磁兼容的概念首次提出，以便解决电磁干扰问题和保证设备及系统的工作可靠性。德国电气工程师协会于 1944 年制定了世界上第一个电磁兼容性规范 VDE-

0878。1945年，美国颁布了美国最早的军用规范 JAN-I-225，并不断地加以充实和完善，使得电磁兼容技术进入新的阶段。

20世纪60年代以后，现代电气电子工程向高频、高速、高灵敏度、高安装密度、高集成度、高可靠性方向发展，其中包括数字计算机、信息技术、测试设备、电信、半导体（电力电子）技术的发展。由于大规模集成电路的出现把人类带入信息时代，近年来信息高速公路和高速计算机技术成为人类社会生产和生活主导技术，同时也由于航空工业、航天工业、造船工业以及其他国防军事工业的需要，在所有这些技术领域内，日益突出的电磁噪声和如何抑制干扰问题引起高度重视，促进了世界范围内电磁兼容技术的研究，使得 EMC 获得空前的大发展。20世纪80年代以来，电磁兼容学已经成为十分活跃的学科，许多发达国家如美国、德国、日本、法国等，在电磁兼容标准与规范、分析预测、设计、测量及管理等方面均达到了很高的水平，有高精度的电磁干扰（EMI）及电磁敏感度（EMS）自动测量系统，可进行各种系统间的 EMC 试验；研制出系统内及系统间的各种 EMC 计算机分析程序，有的程序已经商品化，形成了一套较完整的 EMC 设计体系。在电磁干扰的抑制技术方面，已研制出了许多新材料、新工艺及规范的设计方法。一些国家还建立了对军品和民品的 EMC 检测及管理机构，不符合 EMC 质量要求的产品不准投入市场。

特别值得一提的是，美俄等国已经加紧研究对付核电磁脉冲影响的方法。最近十年，美国科研部门集中力量研究保护通信网和某些军用飞机不受高空核爆炸影响的方法。欧美还有一些国家也已投入力量从事这类科研工作。

随着科学技术的发展，电磁干扰的种类和干扰现象不断变化，对电磁兼容和标准也不断提出新的要求，电磁兼容的研究范围也不断扩大，已经不再局限于电子和电气设备本身，还涉及到电磁污染、电磁信息安全、电磁生态效应及其他一些学科领域，因此，近年来电磁兼容这一学科的研究范畴又被扩大到很多不同分支领域，称为环境电磁学。

我国由于过去工业基础薄弱，电磁环境危害尚未充分暴露，因此在电磁兼容方面的理论和技术研究起步较晚，与国际水平差距较大。我国于1966年制定了第一个部级（原第一机械工业部）干扰标准 JB-854-1966《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法与允许值》；到20世纪80年代，我国开始有组织、有系统地研究并制定国家级和行业级的电磁兼容标准和规范，于1983年发布了第一个国家电磁兼容标准 GB/T 3907—1983《工业无线电干扰基本测量方法》；到2000年，已发布了80多项有关的国家标准。

20世纪80年代以来，我国的电磁兼容学术机构相继成立，国内和国际间学术交流频繁，电磁兼容学科研究得到迅速发展。目前中国已经成功举办了若干届国际电磁兼容学术会议和亚太地区国际环境电磁学学术会议，EMC 理论研究和技术水平逐步与世界接轨。

入世后要遵从的产品国际标准向我们提出了重大挑战。了解 EMC 知识，系统学习 EMC 理论和 EMI 抑制技术，在电气和电子产品设计时从各方面实施 EMC 措施，才能使我们的产品在国际市场上立足。

EMC 是一门独立的学科，随着电磁能量利用的发展，它的研究将有利于预测并控制变化着的地球和天体周围的电磁环境、为了协调环境所采取的控制方法、各项电气规程的制定以及电磁环境的协调和电磁能量的合理应用等。