

电磁干扰防护与电磁兼容

高等教育试用教材

# 电磁干扰防护 与电磁兼容

赖祖武 著  
王淦昌 主审

原

TN03  
L07

原子能出版社

社

TN03  
L07

366167

高等教育试用教材

# 电磁干扰防护与电磁兼容

(初 版)

赖祖武 著  
王淦昌 主审  
谢 羲 审

原子能出版社

京新登字077号

## 内 容 简 介

本书为研究生学位课程教学用书。电磁干扰防护与电磁兼容是一切电气和电子技术中均存在的极为重要的问题；在实际应用中，电磁干扰的防护又是一个令人困扰的问题。本书著者曾长期深入研究过这一问题，现应用其卓越的学识及丰富的经验，并汲取国内外有关这一问题的最新科研成果，编写了这本教材。本书系统地阐述了电磁干扰防护与电磁兼容的基本原理，介绍了解决实际问题的方法和技术。

本书重点突出，尤其是对核电磁脉冲的特性及其防护技术作了较为详尽的论述。本书阐述的原理系统、全面，内容丰富，取材新颖，深入浅出。

本书适用于核物理、核电子学、加速器、电子工程、电子仪器与测试、通信与电子系统、无线电电子学等专业硕士研究生学位课程，可供大学高年级学生选修，也可作为工程继续教育有关专业教材或从事实际工作的科研、工程技术人员的参考书。

\* \* \*

本书由王淦昌教授主审，经原子核物理教材委员会核电子学课程组于1991年8月由屈建石教授主持召开的审稿会审定作为高等教育试用教材。

### 电磁干扰防护与电磁兼容

(初版)

赖祖武 著

王淦昌 主审

谢 羲 审

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张19.625 · 字数472千字

1993年2月北京第一版·1993年2月北京第一次印刷

印数 1—1000

ISBN7-5022-0795-3

TN·9(课)定价: 5.50元

# 前 言

电磁干扰防护和电磁兼容是一门新兴学科。所谓电磁干扰系指一切与有用信号无关的、不希望有的或对电气及电子设备产生不良影响的电磁发射。对于许多人来说电磁干扰并不陌生,甚至在日常生活中都会接触到;但解决电磁干扰问题却往往相当复杂。

电磁干扰是伴随电子和电气技术产生的。电气和电子技术是现代物质文明的基础,电子、电气技术的迅猛发展促进了人类的进步,但也带来了新问题,即电磁干扰越来越严重。一方面电子、电气设备(系统)的广泛应用会造成环境的电磁污染;另一方面,电子、电气设备(系统)在使用中也必须考虑到电磁干扰的影响。目前电子技术向高频率、高速度、高精度、高可靠性、超小型化、智能化方向发展,这个问题便更为突出,成为从事电子、电气工程和科学实验研究人员普遍感到困扰的问题。可以毫不夸大地说,解决电磁干扰问题是电子、电气设备(系统)能否发挥其应有作用的一个关键。

早在19世纪末,电磁干扰问题已引起人们的重视。最初,由于无线电广播、通信的发展,人们不得不集中研究无线电射频干扰,协调和划分频段以避免相互间的干扰。随后,电磁干扰涉及的范围越来越广,除了广播、通信外,科学实验、信息工程、航天、航空、机车、舰船、电力、医疗设备,甚至家用电器等各个领域都存在大量的电磁干扰问题,涉及的频率包括从工频至微波全部频段。近年来,对核电磁脉冲(NEMP)的防护、计算机及信息处理设备引起的瞬态电磁辐射及控制(TEMPEST)、电磁干扰的计算机分析与预测均是这一领域的前沿研究课题。

随着科学技术的进步和先进电子技术的广泛应用,人们已普遍认识到抗电磁干扰问题在发展科学和军事技术中占有十分重要的地位。为了适应当今世界科学、工业和军事技术发展的新形势,培养人才时加强这方面的教育应是当务之急。

近几年著者在中国工程物理研究院及清华大学为研究生讲授这门课程,现根据核工业部教育司(教材委员会)于1988年8月召开的高校教材会议审定的编写提纲写成这本研究生学位课程教学用书。它可作为核物理、核电子学、加速器、电子工程、电子仪器与测试、通信与电子系统、无线电电子学等专业硕士研究生学位课程教材,也可供大学高年级学生选修,并可作为工程继续教育有关专业教材或从事实际工作的科研、工程技术人员的参考书。撰写本书的目的是使读者对电磁干扰防护和电磁兼容问题有一个全面、系统的了解,以作为从事实际工作的入门。由于电磁干扰防护和电磁兼容的特点有很强的应用性,而本教材又希望对于更多的专业有通用性,因此本书包括的内容较广,但作为一本教材又不可能包罗万象。本教材以电子测试系统(设备)为主线进行全面讨论,着重于基本原理的阐述,把许多实际的处理方法和技术加以系统化、理论化,帮助读者建立起全面、正确的概念,学会如何着手去解决实际问题;同时也适当介绍一些解决实际问题的技术,以使读者在实际应用中得到启发和参考。本教材虽然是针对电子测试系统而言,但所阐述的许多原则却具有普遍适用的意义。

全书共12章,可看作三部分。第一部分,第1到第6章为基础知识,介绍电磁干扰防护和电磁兼容的基本问题;第二部分,第7到第10章介绍核电磁脉冲及其防护技术;第三部分,第11和第12两章,分别介绍电磁兼容的标准、主要的测试方法以及电子计算机的模拟分析和预测方法。除了第一部分对所有有关专业均为必读外,其余不一定全部研读,可根据不同

情况加以调整删节。为了适应研究生的教学特点，书中带\*号部分可作为自学或参考内容。授课时间分配大致为：第一部分30~36课时，第二部分10~16课时，第三部分7~12课时。讲授本教材前，学生应学完诸如电磁学或电磁场与电磁波、高等数学、模拟及数字电路等课程。

总之，本书是新开设课程的教材，还缺乏经验，对内容的组织安排也在探索之中，诚恳希望读者提出宝贵意见，以便修改、补充。

本书系著者在多年教学和科研实践基础上写成的。在此向一切曾直接或间接给予过帮助的同志，包括在本研究领域的合作者，表示衷心的感谢。核工业总公司王淦昌教授主审本书，核工业研究生部谢羲教授审校了本书，清华大学王经瑾、屈建石教授、北师大张至善教授、航空航天部二院顾尔顺研究员、北京应用物理与计算数学研究所陈乐山副研究员、原子能出版社袁祖伟副编审参加审阅本书，并提出不少宝贵意见和建议，邓友华同志帮助校对了全部稿件并描绘了全部插图，在此一并表示诚挚的感谢。

著者

于中国工程物理研究院北京研究生部

1992年3月

# 目 录

第一章 电磁干扰防护及电磁兼容的基本概念 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 电磁干扰源的分类及性质 .....	2
1.2.1 电磁干扰源的一般分类 .....	2
* 1.2.2 一些典型电磁干扰源的波形及特性 .....	3
* 1.2.3 时域和频域特性的变换 .....	9
1.3 电磁干扰传播的一般途径 .....	13
1.4 电磁传导耦合 .....	14
1.4.1 直接传导耦合 .....	14
1.4.2 公共阻抗耦合 .....	25
1.4.3 转移阻抗耦合 .....	27
1.5 电磁辐射耦合 .....	30
1.5.1 辐射干扰强度的估计 .....	30
1.5.2 不同性质源的波阻抗 .....	34
1.5.3 辐射对回路耦合的一般讨论 .....	37
1.6 干扰接收器的电磁敏感度及抗扰度 .....	40
1.6.1 电磁敏感度及抗扰度的一般概念 .....	40
1.6.2 接收器对干扰的敏感度 .....	41
1.6.3 几种典型接收器敏感度的比较 .....	43
* 1.7 电磁干扰的抑制和防护的一般方法 .....	44
1.7.1 空域防护控制 .....	44
1.7.2 频域防护控制 .....	45
1.7.3 时域防护控制 .....	47
1.7.4 能域防护控制 .....	47
1.7.5 传导回路的防护控制 .....	48
参 考 文 献 .....	
第二章 屏蔽 .....	50
2.1 屏蔽的基本概念 .....	50
2.2 屏蔽的基本原理 .....	50
* 2.2.1 电场屏蔽的基本原理 .....	50
* 2.2.2 磁场屏蔽的基本原理 .....	51
2.2.3 电磁场屏蔽的基本原理 .....	51
2.3 完整屏蔽体屏蔽效能的计算 .....	52
2.3.1 概述 .....	52
2.3.2 吸收损耗 $A$ .....	54
2.3.3 反射损耗 $R$ .....	55
2.3.4 多次反射损耗 $B$ .....	58
2.3.5 屏蔽效能 .....	59
2.4 不完整或非实壁屏蔽的影响 .....	61

2.4.1	缝隙(孔隙)的影响	61
2.4.2	孔洞的影响	62
2.4.3	波导结构孔洞的影响	63
* 2.4.4	金属网的影响	64
* 2.4.5	编织屏蔽层的影响	65
* 2.4.6	薄膜及导电玻璃的屏蔽影响	66
2.5	屏蔽体整体的设计	67
2.5.1	屏蔽体设计原则	67
2.5.2	屏蔽材料的选择	68
2.5.3	多层屏蔽结构	69
2.5.4	屏蔽不完整性的防护	70
* 2.6	专门的屏蔽元件及接缝屏蔽保证技术	73
2.6.1	屏蔽罩、盖的接缝屏蔽	73
2.6.2	衬垫技术	73
2.6.3	导电胶	75
* 2.7	其他与屏蔽保证有关的电隔离技术	75
2.7.1	隔离变压器	75
2.7.2	光电隔离	75
2.7.3	滤波器隔离	76
参 考 文 献		
<b>第三章 滤波</b>		
3.1	概述	77
3.2	滤波器的主要特性	77
3.3	反射滤波器的原理及原型设计	78
3.4	低通滤波器的设计举例	82
* 3.5	高通滤波器的设计举例	83
* 3.6	带通滤波器的设计举例	84
* 3.7	带阻滤波器的设计举例	86
3.8	损耗滤波器	87
3.9	电源滤波器	89
3.9.1	电源线的干扰	89
3.9.2	电源滤波器的原理	91
3.9.3	补偿扼流圈	92
* 3.9.4	多级及带地线扼流圈的滤波器	92
* 3.9.5	电源滤波器的使用和安装	93
参 考 文 献		
<b>第四章 信号传输回路的干扰及辐射耦合的控制</b>		
4.1	概述	96
4.2	辐射共模耦合	96
4.2.1	辐射共模耦合和地回路耦合的一般概念	96
4.2.2	非平衡线路的共模耦合	99
4.2.3	平衡线路的共模耦合	103
4.3	平衡线路与非平衡线路抑制共模干扰能力的比较	106

4.4 辐射差模耦合 .....	108
4.4.1 平衡线路的差模耦合 .....	108
4.4.2 非平衡线路的差模耦合 .....	110
4.5 减少差模耦合的方法 .....	112
参 考 文 献	
第五章 接地及搭接 .....	116
5.1 接地及搭接的基本概念 .....	116
5.1.1 接地的目的 .....	116
5.1.2 接地的定义 .....	116
5.2 信号地的连接方式及其特点 .....	117
5.2.1 浮地 .....	117
5.2.2 单点接地 .....	118
5.2.3 多点接地 .....	119
5.2.4 复合接地 .....	120
5.2.5 对低频及高频接地网络的要求 .....	120
* 5.3 安全接地及其特点 .....	120
5.3.1 设备安全接地 .....	120
5.3.2 防雷接地 .....	121
* 5.4 对各类接地的要求 .....	123
5.5 系统接地的整体设计 .....	124
5.5.1 基准线系统 .....	124
* 5.5.2 单个设备的孤立系统 .....	125
* 5.5.3 多个设备的组合系统 .....	126
* 5.6 各类接地装置及其电阻值的计算 .....	127
5.6.1 自然接地体 .....	127
5.6.2 人工接地体 .....	129
5.6.3 接地连接线 .....	133
5.7 搭接 .....	134
5.7.1 搭接的定义及目的 .....	134
5.7.2 搭接电阻的准则 .....	135
5.7.3 搭接的方法 .....	136
5.7.4 搭接面的处理及材料的选择 .....	139
* 5.7.5 搭接的有效性 .....	140
* 5.7.6 搭接的测试 .....	141
* 5.7.7 良好搭接的一般原则 .....	143
参 考 文 献	
第六章 电子设备中电路设计的电磁兼容问题 .....	144
6.1 概述 .....	144
6.2 元器件的干扰控制 .....	145
6.2.1 电阻器 .....	145
6.2.2 电容器 .....	147
6.2.3 电感器 .....	150
6.2.4 变压器及扼流圈 .....	154



* 6.2.5 开关和继电器 .....	158
* 6.2.6 小型电动机 .....	161
6.2.7 逻辑电路器件 .....	161
6.3 电路的干扰及控制 .....	163
6.3.1 电源干扰控制 .....	163
6.3.2 单元电路的干扰控制 .....	168
* 6.3.3 级间去耦 .....	170
6.4 电路的布局及配线 .....	171
6.4.1 元器件布局的原则 .....	172
6.4.2 电感元件的布局 .....	172
* 6.4.3 电感元件的屏蔽 .....	174
6.4.4 印制板的配线原则 .....	176
6.4.5 印制板的配线设计 .....	177
* 6.5 电路设计中一些电磁兼容元件的使用 .....	180
6.5.1 电源滤波器及隔离变压器 .....	181
6.5.2 铁氧体磁环 .....	181
6.5.3 射频衬垫及穿心电容器 .....	181
6.5.4 通风孔、窥视窗及开口孔洞的电磁屏蔽元件 .....	181
6.6 TEMPEST技术 .....	182
参 考 文 献	
第七章 环境电磁脉冲及其影响 .....	183
7.1 概述 .....	183
* 7.2 高空核爆炸电磁脉冲 .....	183
* 7.3 低空及地面核爆炸电磁脉冲 .....	186
* 7.4 地下核爆炸电磁脉冲 .....	190
7.5 电磁脉冲对架空长线的影响 .....	191
7.6 电磁脉冲对地下长电缆的影响 .....	196
参 考 文 献	
第八章 $\gamma$ 射线直接作用于系统产生的电磁干扰 .....	199
8.1 概述 .....	199
* 8.2 $\gamma$ 射线照射引起的电导率瞬变效应 .....	199
8.2.1 气体介质的辐射感生电导率瞬变效应 .....	199
* 8.2.2 固体介质的辐射感生电导率瞬变效应 .....	202
8.3 $\gamma$ 射线照射引起的介质电击穿效应 .....	203
8.3.1 气体介质中 $\gamma$ 辐射引起的电击穿效应 .....	203
8.3.2 固体介质中 $\gamma$ 辐射引起的电击穿效应 .....	204
8.3.3 沿边放电击穿 .....	204
8.4 系统电磁脉冲 .....	205
8.4.1 康普顿充电效应 .....	205
8.4.2 金属屏蔽壳体的 $\gamma$ 辐射感生电流 .....	209
8.4.3 电缆的 $\gamma$ 辐射感生电流 .....	210
* 8.4.4 真空管道的 $\gamma$ 辐射感生电流 .....	212
8.5 内电磁脉冲 .....	213

## 参 考 文 献

第九章 强辐射近区的电磁干扰防护	217
9.1 概述	217
9.2 对 $\gamma$ 射线直接辐射效应的防护	217
* 9.2.1 $\gamma$ 射线的防护原则	218
9.2.2 在强 $\gamma$ 辐射环境中核辐射探头及传感器的设计原则	220
* 9.2.3 受 $\gamma$ 射线照射的器件中防止感生瞬变电导率及电击穿的控制原则	221
9.3 对环境电磁脉冲的防护	222
9.3.1 完整电磁屏蔽体	222
9.3.2 非完整电磁屏蔽体	223
9.3.3 具有贯穿导体时屏蔽完整性的保证措施	224
* 9.3.4 进出屏蔽体电缆的防护	226
9.4 对内电磁脉冲及辐射感生电流的防护	227
9.5 高地电位的接地	227
* 9.6 滤波连接器	229
9.7 对电涌的防护	230
9.7.1 电涌保护器件	231
9.7.2 电涌保护电路	238
9.7.3 瞬时干扰的时间回避防护方法	245

## 参 考 文 献

第十章 信号传输过程中电磁干扰的防护控制	248
10.1 信号传输过程的主要电磁干扰	248
10.1.1 信号传输的主要方式及受干扰的特点	248
10.1.2 核试验及加速器实验中测试信号传输过程的主要电磁干扰环境	248
* 10.2 信号传输段空间电磁场的防护	253
10.2.1 信号传输电缆的选择原则	253
10.2.2 电磁屏蔽槽的设计	258
10.3 信号电缆皮电流引入的干扰及其削弱方法	259
10.3.1 电缆皮电流的“振铃”现象	259
10.3.2 电缆皮电流的削弱方法	260
* 10.4 信号传输回路干扰耦合的控制	262
10.4.1 非平衡传输系统辐射耦合地回路面积的控制	262
10.4.2 平衡传输系统辐射差模耦合回路控制	263
10.5 电缆间串扰的控制	264
10.5.1 串扰的定义及机制	264
10.5.2 串扰的估计及控制	265
* 10.6 提高传输系统自身抗干扰能力的一些其它方法	266
* 10.7 时间回避技术	267

## 参 考 文 献

第十一章 电磁干扰及兼容性的标准和主要测试技术	269
11.1 概述	269
11.2 国外电磁干扰及兼容标准简介	270

11.3 我国电磁干扰及兼容标准简介 .....	272
* 11.4 传导干扰的测量 .....	272
11.4.1 传导干扰测量原理 .....	272
11.4.2 人工电源网络 .....	273
11.4.3 传导干扰测试的布置 .....	274
11.4.4 传导干扰测量探头 .....	275
* 11.5 传导敏感度的测量 .....	276
11.5.1 电源传导敏感度测量 .....	276
11.5.2 地线传导敏感度测量(10~50kHz) .....	279
11.5.3 射频电流注入金属外壳及电缆屏蔽层的传导敏感度测量(10~30kHz) .....	279
* 11.6 辐射干扰的测量 .....	280
11.6.1 试验场地 .....	280
11.6.2 接收天线 .....	281
11.6.3 测试原理及布局 .....	283
* 11.7 辐射敏感度的测量 .....	286
11.7.1 小型设备的磁场敏感度测量——赫尔姆霍兹线圈法(30Hz~15kHz) .....	287
11.7.2 中型设备的磁场敏感度测量——环形天线法(30Hz~30kHz) .....	288
11.7.3 大型设备的磁场敏感度测量——框形天线法(D.C.~2MHz) .....	288
11.7.4 电场敏感度测量的长天线法(14kHz~30MHz) .....	289
11.7.5 电场敏感度测量的发射天线法(14kHz~200MHz) .....	291
11.7.6 电场敏感度测量的横电磁波传输室法 .....	291
11.8 核电磁脉冲的敏感度测量 .....	292
* 11.9 半导体器件电磁脉冲损伤阈值试验的直接注入法 .....	293
参 考 文 献	
第十二章 电磁干扰的计算机分析与预测 .....	295
12.1 概述 .....	295
12.2 数学模型 .....	296
12.2.1 干扰源模型 .....	296
12.2.2 耦合模型 .....	297
12.3 分析程序 .....	298
12.3.1 SEMCAP .....	298
12.3.2 IAP .....	299
12.3.3 其它系统内部及子系统间电磁干扰分析程序 .....	301
12.3.4 系统间电磁干扰分析程序 .....	302
12.4 电磁干扰的预测与分析方法 .....	302
参 考 文 献	

# 第一章 电磁干扰防护及电磁兼容的基本概念

## 1.1 概 述

现代科学技术无一能离开电气、电子设备或系统。这些电气、电子设备或系统工作时一方面对周围的电磁干扰都十分敏感，另一方面它们本身又会向周围发出电磁干扰信号，影响其它电气、电子设备或系统正常运行。这些现象即使在日常生活中也是常见的。例如，附近的汽车点火系统会使电视机的图像跳动并出现爆裂声；接通或断开电源开关会使收音机发出“卜卜”声；使用手电钻或电焊机会使计算机运行不正常，甚至遭到损坏。所有对于电气、电子设备(系统)来说不希望有的电磁现象(电压、电流或电磁场)统称为电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)或电磁噪声。实际上我们所生活和工作的环境中均存在电磁干扰，只不过当它们的影响比较小时，没有引起人们足够的重视。当前，对电磁干扰特别敏感的电子设备和系统已广泛地被应用，因此电磁干扰问题已日益引起严重关注。人们努力从事电磁干扰的控制(Electromagnetic Interference Control, EMIC)工作，以解决电气和电子系统受电磁干扰问题<sup>[1~2]</sup>，这就提出了电磁兼容性的概念。所谓电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility, EMC)<sup>[3]</sup>包括两方面的含义：(1)电子系统或设备之间在电磁场环境中的相互兼顾；(2)电子系统或电子设备在电磁环境中能正常工作。这就是说，设计一个电子系统或设备时一方面必须保证在所处的电磁环境中能按设计要求正常工作；另一方面也必须限制自身发出的电磁噪声使之不致影响其它系统或设备的正常工作。我们把满足这些要求的设备和系统称为电磁兼容的。

随着科学技术的进步，工业的发达，除了自然界存在的电磁现象以外，通信、电力、大量的设备运行和交通运输带来的人为电磁干扰，特别是人类进入太空，掌握核武器技术，发展电子战技术使电磁环境越来越复杂和严重。与此同时，电子技术(包括计算机技术)本身又朝着高频、高速度、高灵敏度、高可靠性、多功能化、小型化、大规模集成化、复杂化和大功率、小信号的应用等方面发展，因此电磁干扰问题就愈来愈突出，已成为许多设备、系统能否发挥正常作用的主要障碍；犹如工业带来的“三废”污染，电磁干扰被视为环境电磁污染。

因此，目前许多发达国家在一些先进科学技术或军事领域中研制、生产电子设备(包括计算机)时都把电磁兼容性作为重要的设计原则来考虑。电磁兼容工作的主要任务，可以用一句话来形容，即和电磁污染作斗争。

目前，电磁兼容问题已引起电子工程工作者日益广泛的重视。电磁兼容性作为电子学的一个分支亦已渐趋成熟，每年都有大量的文章发表<sup>[4~13]</sup>，但是，对强辐射环境中的电磁兼容问题，许多人还不大了解，而强辐射环境(包括核爆炸、飞行器空间飞行及加速器运行等)不仅存在强辐射本身对电子设备(系统)的直接影响，而且强辐射还会产生电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)，对电气及电子设备(系统)产生严重的电磁干扰。因此，在强辐射

环境中工作实验研究工作者、电子工程人员都应十分重视和了解强辐射所引起的电磁干扰的性质,并知道如何去实施实验系统、电子设备(系统)在强辐射环境中的电磁兼容问题,即解决电磁脉冲的防护问题。

构成电磁干扰有三个要素,即干扰(发射)源、干扰的传播途径及干扰接收器。

所谓干扰源系指任何产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统、系统或自然现象。干扰的传播途径系指干扰通过何种媒介,以何种方式(包括传导、辐射)送至接收器。干扰接收器系指一切受到电磁干扰的元件、器件、设备、分系统或系统。因此这些也是电磁干扰防护和电磁兼容工作所包括的三个主要内容。

为此,本书下面介绍电磁兼容性的基本概念时,将按干扰源、干扰的传播耦合途径以及干扰接收器三方面逐一作全面的论述。

## 1.2 电磁干扰源的分类及性质

### 1.2.1 电磁干扰源的一般分类

电磁场存在于整个宇宙中,包括太空、大气层、地球表面及地下,可以说我们所处的任何地方都存在电磁干扰,问题在于其影响是否超过被干扰对象所允许的阈值。

电磁干扰源是一个笼统的概念,一般说来可以分两大类:自然干扰源和人为干扰源。

自然干扰源主要是:雷电、太阳异常电磁辐射及来自宇宙的电磁辐射等。

雷电属于常见的大气层电磁干扰源,它的闪击电流很大,可达 MA 以上,但雷电的范围很小,电流的上升时间为  $\mu\text{s}$  级,而持续时间可达 ms 至 s 级,因此雷电所辐射的电磁场频率主要为 10Hz~100kHz,但可以传播至很远距离。

太阳的异常噪声和磁暴是和太阳黑子活动现象有关的,它们的频谱主要在数十 MHz。

宇宙辐射包括来自银河系及超远星系的电磁噪声及高能粒子。来自星系的电磁噪声根据不同的星系,其频谱落在数十 MHz 至数十 GHz 的不同频段内。宇宙高能粒子在适当的条件下,例如与物质相互作用时也会产生电磁辐射。

人为干扰的范围非常广泛,且种类繁多,但从干扰的性质来分,有的属于有意干扰,其余则为无意干扰。

对于电子战中那些为使对方的通信、广播、指挥及控制系统造成错误判断、失效、乃至损坏而故意在对方所使用的频带内发出相应的电磁干扰信号称为有意干扰。这种有明确目的和对象的有意干扰和反干扰问题不属于本书的讨论范围。

除了有意干扰之外的人为干扰均称为无意干扰。

造成无意干扰的来源很多,无法一一列举,但从属性来看又可以分为功能性干扰和非功能性干扰;从传播的方式来看,可分为传导干扰和辐射干扰。不论功能性干扰或非功能性干扰均有传导传播或辐射传播方式,或两者同时兼有。

所谓功能性干扰系指由于设备(或系统)内部一部分的功能实现过程所造成的对另外部分功能的直接影响。由于功能性干扰的频率及电平是设计中所确定的,只是影响的部位和耦合途径是无意的,即事先未预料到或寄生的,这种干扰一般比较容易控制和解决。

所谓非功能性干扰系指由外界引入设备(系统)的无用干扰,或者虽是由设备(系统)内部

的功能部件所引起，但它不是直接作用于受害部位，而是间接作用于受害部位。换言之，它作为某些有用辐射的未经预料的副产品作用于受害部位。

常见的人为干扰源有如下几种：

高频及微波设备——例如高功率微波发射机、雷达、高频发射机、高频感应炉、微波炉、微波治疗机等。

高压设备——例如高压电源、高功率脉冲设备、高压强流脉冲加速器等。

开关设备——例如各种脉冲发生器、数字计算机、继电器、交换子等。

功率设备——例如电动机、焊接机等。

火花设备——一切可能产生电火花之部件，如高压点火脉冲装置、电机电刷、汽车点火设备、手电钻、吸尘器等。

静电放电——空中飞行的飞机、运油行驶的汽车、人体（特别是穿毛皮或人造纤维服装的人或在地毯上行走的人）都会积累静电，产生的电压高达数 kV 乃至数十 kV，有的甚至达到 1MV。当仪器、设备或器件靠近累积有静电又未经放电处理的物体或人体时会产生静电放电，从而引起干扰或导致设备损坏。

核电磁脉冲——核爆炸时会产生极强的核电磁脉冲(Nuclear Electromagnetic Pulse, NEMP),其强度可达  $10^5\text{V/m}$  以上,其分布的范围也极广,特别是高空核爆炸可达数千 km。

除了核爆炸以外，强流脉冲加速器也会产生极强的电磁脉冲。

内电磁脉冲及系统电磁脉冲——强  $\gamma$  射线脉冲打在金属腔体内会激发产生内电磁脉冲(Internal Electromagnetic Pulse, IEMP),其强度亦达  $10^5\text{V/m}$  以上。

强 X 射线或  $\gamma$  射线脉冲打在壳体表面又会产生系统电磁脉冲(System Generated Electromagnetic Pulse, SGEMP),它所引起的浪涌电流可达数百 A。作为定向能武器的强激光也同样会产生系统电磁脉冲。

核电磁脉冲、内电磁脉冲、系统电磁脉冲对于导弹核武器、各种航天飞行器、飞机、军舰、地面无线电通信指挥、控制系统、以及各种电子设备都是严重的人为电磁干扰源。

在实验室中进行物理实验时，加速器或其它强  $\gamma$ 、强 X 射线以及惯性约束聚变装置也都有可能伴随产生电磁干扰。

高功率微波武器——目前国外正在研究的高功率微波弹或称电磁脉冲弹，将是未来最严重的人为电磁干扰源。它的目的是靠所发出的强大功率微波使对方导弹核武器的电子系统或地面的电子控制系统以及在它作用范围内的一切电子设备、通信设施遭受干扰，不能正常工作，甚至损坏。

在实验室中高功率微波发生器，包括由高功率电子束驱动的微波辐射设备也同样起着电磁干扰源的作用。

除了上面从电磁干扰产生的机制来进行分类外，还可以根据电磁干扰的传播及引入受害设备(系统)的方式来分类，即又可以将电磁干扰划分为传导干扰及辐射干扰。

### \* 1.2.2 一些典型电磁干扰源的波形及特性

关于电磁干扰，人们首先关心的是干扰的强度、功率、频率、周期和持续时间等。对于电压或电流型的干扰通常是在时域中进行观察，例如用示波器来观察其波形。对于功率型干扰，通常关心的是干扰的脉冲功率、平均功率或功率密度，这可以通过功率计加以测定。

为了便于在后面的章节中对干扰作用的性质进行分析，在此列举几种常见的典型干扰波形。

### 1.2.2.1 周期性连续功能干扰的波形

通常由功能器件周期性动作所引起干扰的波形属于周期性的波形，例如振荡器、脉冲发生器、开关电源、逻辑电路工作时产生的波形就是分别为周期性正弦（余弦）信号、矩形脉冲、尖脉冲、指数脉冲、梯形脉冲或三角形脉冲。

周期性干扰波形的特点是前后相邻的波形具有确定的形状和联系。

最常见的干扰波形是正弦（余弦）信号及矩形脉冲。正弦信号由振荡器产生，而矩形波是开关电源、逻辑电路等的最基本的波形。理想矩形波的上升及下降都是跳跃陡变，但实际上由于电路的阻容影响，波形均存在一定的畸变，有上升沿和后沿，通常可以梯形波来作近似处理。

尖形波是矩形波的微分波形，实际上是指指数衰减的波形。三角形波和梯形波分别可以认为是矩形波加于线性充、放电电路再加削波钳位得到的。矩形脉冲调制正（余）弦信号时则产生矩形调幅信号。

### 1.2.2.2 阻尼振荡波形

阻尼振荡是一种常见的干扰波形，许多场合都可能产生阻尼振荡干扰波，现举一些最常见的例子。

#### I. 开关的接通和断开

通常开关电路的负载可以认为是电感  $L$  和电阻  $R$  串联的电路，实际上总是存在分布电容  $C$ ，因此  $L$ 、 $R$ 、 $C$  可构成振荡回路，当开关接通及断开时，负载两端分别呈现叠加于充电及放电波形上的阻尼振荡波形。

波形的振荡频率  $f$ ，取决于电感及电容值。一般开关电路的电感负载为零点几  $mH$  至几  $mH$ ，电容为  $1 \sim 10 pF$ ，则振荡频率为  $100 kHz \sim 10 MHz$ 。阻尼常数取决于  $R/2L$ ，而充、放电时间常数则由  $C$  及整个电路的电阻值决定。

#### II. 火花放电

在高压实验室中，高压电火花球隙放电会产生十分强烈的电磁干扰，这是由于放电电流在电容器和电感（包括引线电感）组成的振荡回路中振荡辐射高频电磁波所致。其等效回路及振荡波形分别如图 1-1(a) 及 (b) 所示。振荡的频率一般为  $100 kHz \sim 1 MHz$ ，由于电能的逐渐消耗振荡呈阻尼衰减。

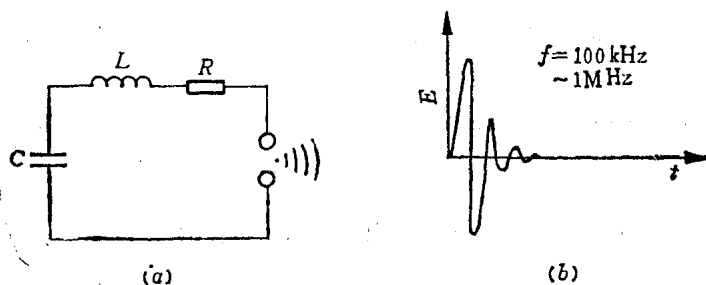


图1-1 高压火花球隙放电示意图

(a) 等效电路； (b) 振荡波形。

实际上, 当任何高压线路中两个端点接触不良或导线断开时往往会产生火花, 此时也会产生类似的阻尼振荡干扰。

一些工业设备, 由于电动机的电刷产生电火花放电也要发射电磁干扰, 而电刷的运动为周期性, 因此这类高频振荡辐射也是周期性发生的。

电刷放电也是阻尼振荡, 一般振荡周期为数  $\mu\text{s}$ , 即振荡频率为  $100\text{kHz}\sim 1\text{MHz}$ , 而一次持续时间为数  $\mu\text{s}$ 。

还有一类是电焊机, 当焊接时有大电流流通并产生电火花, 除了直接辐射电磁场外, 还可通过公共电源线对供电电压产生干扰, 即在  $50\text{Hz}$  的电压波形上叠加上高频振荡的波形。高频振荡的频率亦在  $100\text{kHz}$  左右, 振荡的幅度可达  $100\text{V}$  以上。当焊机工作时, 从示波器上观察整个电源波形均叠加上高频干扰波形, 而当电焊机停止工作时, 高频干扰即消失。

### 1.2.2.3 静电放电

静电放电(Electrostatic Discharge, ESD)<sup>[14~19]</sup>, 特别是人体的静电充电和放电现象, 也是电子学工作者应予以密切注意的电磁兼容问题。我们熟知有些材料如毛皮和琥珀相互摩擦后会产生电荷, 这些材料称为摩擦电类材料。两种摩擦电类材料紧密接触摩擦后分开, 便荷电, 其中有的荷正电, 有的荷负电; 一些资料<sup>[14]</sup>列出了一系列这类材料及其荷电情况, 如表 1-1 所示。表中所列的荷正电或荷负电情况仅供参考, 实际上荷电情况还要取决于材料表面的具体情况。

表 1-1 常见的摩擦电材料

空气	人体	石棉	兔毛	羊毛	毛皮	人发	尼龙	丝	琥珀	木材	棉	玻璃	云母	纸	铅	铝	钢			
荷正电+																				
硬橡胶	聚乙烯	聚丙烯	乙烯树脂	聚三氯乙烯聚合体	聚氨脂	赛璐珞	沙纶	醋酸酯	聚四氟乙烯	硫磺	铜	镍	金	铂	银	紫铜	硅	人造丝	荷负电-	

人体和毛皮、毛料织物、人造纤维织物摩擦会荷电。例如一个穿塑料底鞋子的人在人造纤维地毯上行走, 每走一步都会在鞋底留下多余的负电荷, 在地毯上留下多余的正电荷。这样, 在人与地之间就会建立起充电电压, 一般只要  $1\text{min}$  左右就会使充电与放电达到平衡, 如图 1-2 所示, 图中二条曲线表示充电电压的范围。人在地毯上行走建立起的充电电压一般为  $10\sim 15\text{kV}$ , 平均为  $12\text{kV}$ , 有时可高达  $20\sim 25\text{kV}$ , 不过最高也不会超过  $40\text{kV}$ , 因为过高的电压会产生电晕, 会自动地将电荷释放掉。人在乙烯地板上行走可产生约  $4\text{kV}$  的平均电压, 在台阶上产生的平均电压约为  $0.5\text{kV}$ 。人体电容之典型值  $C_b$  为  $150\text{pF}$  ( $100\sim 500\text{pF}$ ), 人体电阻之典型值  $R_b$  为  $1\text{k}\Omega$  ( $50\sim 5000\Omega$ )。当荷电之人体靠近金属(电子设备)时会将积累的电荷释放掉, 即引起静电放电。静电放电(ESD)时由于其电压很高, 瞬时电流可以很大。若充电电压  $V_c$  为  $15\text{kV}$ , 则人体放电电流峰值  $I_c$  可达  $7.5\text{A}$ 。但由于静电积蓄之能量很小 ( $E =$



$\frac{1}{2}C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 150 \times 10^{-12} \times 15^2 \times 10^6 = 17\text{mJ}$ ), 因此放电之持续时间很短, 约为 150ns, 如图 1-3 所示。从图中可以看出有时还会出现小的振荡, 其频率约为 200MHz。

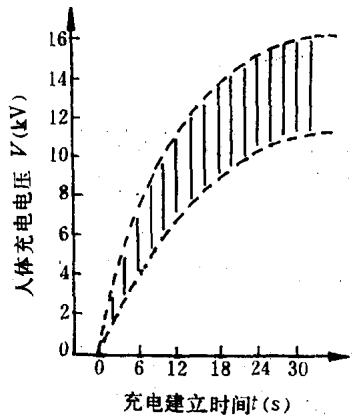


图 1-2 人体静电充电示意图

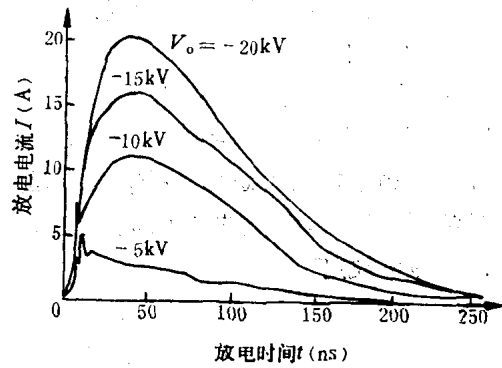


图 1-3 人体静电放电示意图

目前半导体器件向大规模集成电路发展, 并已采用亚微米工艺, 功耗降低, 因此更经不起高电压、大电流的冲击。对耐压影响最大的是沟道长度及栅氧化层的厚度。预计 CMOS/SOS, GaAs 这些新器件的最短沟道长度可达  $0.25\mu\text{m}$ , 栅氧化层的最薄厚度小于  $0.1\mu\text{m}$ 。氧化层的最大耐压是  $1\text{kV}/\mu\text{m}$ , 因此新型器件在冲击电压下是十分易损的。我们以引起结及绝缘层击穿之静电放电电压  $V_{ESD}$  作为半导体器件易损性的表征值, 将一些常见的半导体器件对静电放电的易损性的参考值列于表 1-2 以供比较。

#### 1.2.2.4 雷电

雷电是人们常见的自然电磁干扰源<sup>[20~22]</sup>, 它的波形类似电火花放电, 但电流非常强大, 峰值  $I$  可达  $200\text{kA}$  以上。典型的单次雷电的波形如图 1-4 所示, 其上升时间约为  $10\mu\text{s}$ , 持续时间为数 ms。由于电流十分强大, 若直接击中地面, 即使地电阻只有零点几  $\Omega$  至数  $\Omega$ , 也会产生数万 V 的电压。

表 1-2 一些常见器件的静电放电易损性参考值

器件类型	对静电放电(ESD)的易损性(V)
肖特基二极管	300~2500
肖特基 TTL	1000~2500
双极晶体管	380~7000
ECL	500~1500
可控硅(SCR)	680~1000
JFET	140~7000
MOSFET	100~200
CMOS	250~3000
GaAsFET	100~300
EPROM	100

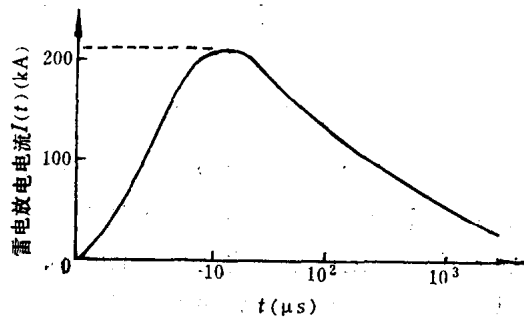


图 1-4 雷电电流波形示意图

关于感应雷, 雷电系通过多个较小的电流脉冲将能量释放掉。在发生雷电点的附近, 最大的强度可达数万  $\text{V}/\text{m}$ , 雷电的频谱为数 Hz 至  $300\text{kHz}$ , 主频为数  $\text{kHz}$ 。

雷电的破坏力虽然极大, 但作用的区域很小, 一般造成直接破坏的范围只有数  $\text{m}^2$  至数十  $\text{m}^2$ 。