

射频和微波辐射 及其防护技术

叶宗林 编著



第四机械工业部第十设计研究院

射频和微波辐射及其防护技术

叶宗林 编著

四机部第十设计研究院

内 容 简 介

本书从电波防护出发,讨论了电磁场感应与电波辐射、电波的生物学效应、近区电磁场强度和微波漏能的测量技术以及有关的屏蔽防护措施。

本书可供射频和微波工作人员、环保和劳保工作人员以及有关医务人员参考。

射频和微波辐射及其防护技术

叶宗林 编著

*

编 辑 四机部第十设计研究院《射频和
出 版 者 微波辐射及其防护技术》编辑组
排 版 北京宣武区广内印刷厂
印 刷 者:

(内 部 发 行)

*

787×1092 1/32·印数:1—2,500册·字数:156千字

前 言

环境电磁工程学，又称电磁兼容学（Electromagnetic Compatibility—EMC）是近三十年来国际上新兴的一门边缘学科。它是研究，在信号和干扰共存的条件下，使包含在信号中的信息不受损害；或者说，在新的电磁环境中，寻求某种控制方法，以实现新的电磁环境协调。电磁兼容学涉及到工程学、物理学、医学、经济学和社会学等多种学科。其研究对象，除了电子设备外，还包括使用设备的人。

随着近代科学技术发展，电气和电子设备的功率迅速增大。据统计，二次世界大战后，平均每10年发射机功率增加10~30倍。例如，1940年雷达发射机的平均功率仅10瓦左右，到了六十年代末则达1兆瓦以上。目前，已出现功率达10兆瓦的发射机，并继续朝百兆瓦量级发展。据报道，高功率电平微波照射（ $>300\text{mw}/\text{cm}^2$ ），能对人的机体造成伤害；低功率电平（几百 $\mu\text{w}/\text{cm}^2 \sim$ 几 mw/cm^2 ）的长期慢性微波照射，可以引起人体中枢神经和心血管系统功能紊乱。

目前，电气和电子设备已遍及工业、农业、交通运输业、国防军事以及医疗卫生等各个领域，甚至普及到人们的日常生活中，如国外普遍用于家庭中的微波灶等。使之接触电磁辐射的人员大大增加。因此，以人为主体的电磁兼容性问题已成为当今众所关切的问题。

本书从电波防护角度，综合国内外有关电波对人体健康

影响的论述，讨论电磁感应与辐射以及有关的屏蔽防护技术。

本书是在四级部生产调度局主办的“安全技术交流会”讲义的基础上修改、补充的。由于笔者水平有限，对书中错误和不妥之处，请予批评指正。

在出版过程中，赵季复、杨绍炎、赵忠抗、卢铤功、刘瑛、徐远芝等同志做了大量工作，在此表示衷心感谢。

编 著 者

1981年2月于北京

目 录

第 一 篇

电磁场与电波辐射

第 一 章 概 论

§ 1-1	电磁辐射的危害	1
§ 1-2	电离辐射与非电离辐射	3
§ 1-3	电磁泄漏与辐射	6

第 二 章 静 电 场

§ 2-1	库伦定律	7
§ 2-2	电场强度	9
§ 2-3	高斯定律	12
§ 2-4	电 位	15
§ 2-5	静电场中的导体和电介质	17
§ 2-6	电 容	22
§ 2-6	静电场的能量	24

第 三 章 稳 定 磁 场

§ 3-1	磁场及磁感应强度	25
§ 3-2	比奥——沙瓦定律及磁场强度	27
§ 3-3	全电流定律	30

第 四 章 电 磁 感 应

§ 4-1	法拉第电磁感应定律	31
-------	-----------	----

§ 4-2	自感与互感	33
§ 4-3	磁场的能量	39
第 五 章 交变电磁场		
§ 5-1	位移电流	40
§ 5-2	交变电磁场的基本概念	42
§ 5-3	电磁波的基本概念	47
§ 5-4	平面电磁波在导体和介质材料中的 传播特性	52
第 六 章 感应场与辐射场		
§ 6-1	概 述	58
§ 6-2	电小天线的电磁场	63
§ 6-3	近区场与远区场	68
§ 6-4	感应与辐射	74

第 二 篇

电磁环境对生物体的影响

第 七 章 微波辐射对人体健康的影响		
§ 7-1	微波辐射对生物体功能的影响	81
§ 7-2	慢性微波辐射对作业人员健康的影响	87
第 八 章 高频电磁场对人体健康的影响		
§ 8-1	高频作业环境中的电磁场强度	90
§ 8-2	高频电磁场对作业人员健康的影响	94
第 九 章 电波的生物学效应		
§ 9-1	电磁波在生物体中的传播特性	97

§ 9-2	电波在生物机体组织的热效应	108
§ 9-3	非均匀场中的介电泳力效应	112
§ 9-4	电磁场的场力效应	117
§ 9-5	固态物理力学在电波生物学效应中的作用	119
§ 9-6	生物体中的超导电性	121
§ 9-7	致热效应和非致热效应	124
第 十 章 电波照射卫生标准		
§ 10-1	受照标准与辐射标准	126
§ 10-2	国外电波照射卫生标准	127
§ 10-3	我国暂行的微波照射卫生标准	130
§ 10-4	空间电波噪音	130

第 三 篇

电磁场近区场强和微波漏能的测量

第十一章 高频及甚高频电磁场近区场强测量

§ 11-1	近区场强测量特点	134
§ 11-2	近区场强测试天线	135
§ 11-3	RS-2 型高频电磁场近区场强测量仪	140
§ 11-4	DCHY-801 型甚高频电场近区场强 测量仪	144
§ 11-5	国外新型近区场强仪	144

第十二章 微波漏能测量

§ 12-1	电阻性敏感器件与微波功率密度测量	416
§ 12-2	微波漏能测量特点	150
§ 12-3	RL-761 型微波漏能测试仪	151

第 四 篇

电 波 辐 射 的 防 护

第十三章 电波防护的若干途径

§ 13-1	概 述	155
§ 13-2	降低设备漏场和漏能电平	156
§ 13-3	增加电波在媒质中的传播衰减	161
§ 13-4	微波天线试验场防护要点	163

第十四章 电磁屏蔽原理

§ 14-1	概 述	164
§ 14-2	电波在均匀的无限金属板中传播过程	167
§ 14-3	均匀屏蔽理论——金属板屏蔽效能计算	170
§ 14-4	金属网屏蔽效能计算	175
§ 14-5	非均匀屏蔽理论——屏蔽效能的评定	182
§ 14-6	洞孔屏蔽效能计算	186
§ 14-7	屏蔽壳体空腔谐振	191

第十五章 屏蔽室设计

§ 15-1	概 述	192
§ 15-2	屏蔽材料的选择	195
§ 15-3	屏蔽室结构	204
§ 15-4	电源滤波器	208
§ 15-5	屏蔽室接地	211
§ 15-6	屏蔽效能测试	214

第十六章 屏蔽防护实例

§ 16-1	高频设备的屏蔽防护	218
§ 16-2	微波设备的屏蔽防护	226

第 一 篇

电 磁 场 与 电 磁 辐 射

第一章 概 论

§ 1-1 电磁辐射的危害

近三十年来,电磁辐射的危害已越来越引起人们的重视。它和一般环境污染源不同。对于一般环境污染的危害,一直到现在最近被人们认识之前,尽管它是潜伏着的,但却始终是存在的。而电磁辐射的危害,在过去之所以没被人们认识,主要是由于其功率电平低,从而表现为微弱或者几乎不存在。但是,随着近代科学技术的发展,电气和电子设备的功率迅速增大。目前已出现有兆瓦量级的雷达装置和有效发射功率为几兆瓦的通讯设备。而且正在研制平均功率为5~10兆瓦的发射机,并继续朝100兆瓦量级方向发展。另一方面,电气和电子设备的应用范围,已遍及到工业、农业、军事以及医疗卫生等各个领域,甚至普及到人们的日常生活中,如广泛应用于家庭中的微波炉等,从而使接触电磁辐射的人员大大增加。于是,对电磁辐射危害以及其防护技术的研究,已成为众所关切的问题。

电磁辐射造成的危害有以下三方面:

(1) 电磁辐射对军械装置的危害。高电平电磁感应和辐射可以使电爆兵器控制失灵,发生意外引爆。

(2) 电磁辐射对挥发性物质的危害。高电平电磁感应和辐射可以引起挥发性液体或气体意外燃烧。

(3) 电磁辐射对人体健康的危害，这点是最主要的。

由于受篇幅所限，在本书中仅就电磁辐射对人体健康的危害以及有关的防护技术进行讨论。

大家知道，在地球表面，自然界电场强度为 150 v/m 量级（在雷雨活动季节，可增加到 10^4 v/m ），而地磁最大值为 $5 \times 10^{-5} \text{ tesla}$ （0.5 高斯）。这些自然电磁场数值将随着频率上升而迅速降低。例如，在频率为 50 HZ 时，自然界背景电场为 10^{-4} v/m ，磁场为 10^{-12} tesla 。因此，人们在这种电磁环境中生活是完全处于正常状态。但是，由于电气和电子设备的功率不断增加，使得从这些设备泄漏和辐射出来的电磁场，远远地超过了自然界背景电磁场。例如，离一般白炽灯泡 30 cm 处，其电场强度为 2 v/m ；而在 525 KV 架空电线下，其电场强度却超过 10^4 v/m 。据统计，第二次世界大战后，微波发射机的平均辐射功率，平均每 10 年增加 10 ~ 30 倍。例如，1940 年雷达发射机的平均功率仅为 10 瓦左右，到 60 年代末期却达 1 兆瓦量级。由此可见，随着电气和电子设备的功率和数量的增加，人们将处于高电平的电磁环境中。

1950 年，首次报导一名美国雷达技术工人在 $1500 \sim 3000 \text{ MHZ}$ 频段，功率密度为 100 mw/cm^2 下工作一年后发现二侧性白内障。从此，电磁辐射对人体健康的危害引起了人们普遍的重视。电磁辐射危害的另一个极端例子是，美国加州一个妇女为了在微波灶中烘干她的心爱小狗，却无意中把它杀死。据苏联有关资料报导，电磁辐射还能引起中枢神经系统

和心血管系统的变异。

电磁辐射对人体健康的危害大体上可以分为两种，即致热效应和非热效应。但对非热效应问题在国际上尚存在有争议。近几年来，虽然在这方面做了很多研究工作，但其未知部份还很多，特别是关于电磁辐射的生物学效应问题。因此，对电磁辐射危害的明确认识，尚有待于今后进一步探索。

1969年国际电磁兼容讨论会上，与会者一致呼吁把微波辐射增写进必须被控制的空气污染危害物一览表中。这一建议已被联合国人类环境会议采纳。

§ 1-2 电离辐射与非电离辐射

根据电磁学原理，任何一个带有电荷的物体均能在其周围产生电场，任何一个通有电流的导体均能在其周围产生磁场。因此，当带电系统的电荷或电流不断地随时间变化，则系统所产生的电场和磁场也随时间变化。随着时间的推移，这种交变的电场和磁场不断地向系统周围扩张，并逐渐脱离系统母体，各自形成闭合回线。由于交变的电场能在其周围激发磁场，而交变的磁场也能在其周围激发电场，于是这种脱离了系统母体的电场和磁场是以自己维持自己的方式向外辐射。我们称这种自持运动着的电磁场为电磁波。

无线电波是一种电磁波，现代无线电所使用的频率约为10KHZ~300 GHZ(相当于波长为30000米~1毫米)。无线电波还可以按频率高低(即波长的长短)再进行划分，如表1-1所示。

表 1-1 无线电波的波段划分

波段名称及缩写	频率范围	以波长划分的名称
甚低频 (VLF)	3~30 KHZ	万米波 (甚长波)
低 频 (LF)	30~300 KHZ	千米波 (长 波)
中 频 (MF)	300~3000 KHZ	百米波 (中 波)
高 频 (HF)	3~30 MHZ	十米波 (短 波)
甚高频 (VHF)	30~300 MHZ	米 波 (超短波)
特高频 (UHF)	300~3000 MHZ	分米波
超高频 (SHF)	3~30 GHZ	厘米波
极高频 (EHF)	30~300 GHZ	毫米波
	300~3000GHZ	亚毫米波

光波也是一种电磁波，只不过其频率极高、波长极短。不可见光，如红外线、紫外线以及 x 射线等也还是一种电磁波；红外线的频率低于可见光，而紫外线和 x 射线的频率高于可见光。来自遥远太空、比 x 射线频率更高的宇宙线，是电磁波频谱的最高段。比无线电波频率更低的电波，如甚低频 (VLF) 电波和极低频 (ELF) 电波也是一种电磁波。甚低频电波的频率很低，最低可达 3 KHZ；而极低频电波的频率更低，小于 300 HZ。可以这样说，包括工频频率在内的所有交流电磁场都处于电磁波的频谱中，而频率为零的直流电是电磁波频谱的起点。

从量子力学观点，所有电磁辐射都是由运动着的粒子组成。这些粒子称为光量子。每个光量子能量称为量子能量，用电子伏特 (ev) 或尔格 (erg) 来表示。量子能量取决于频

率，令 Σ 表示量子能量，则

$$\Sigma = hf \quad (1.1)$$

式中 Σ ——量子能量，erg；

h ——普朗克常数， $h = 6.63 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ ；

f ——频率，HZ；

($1 \text{ ev} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg}$)

图 1-1 表示各有关电磁波频谱及其相应的量子能量。

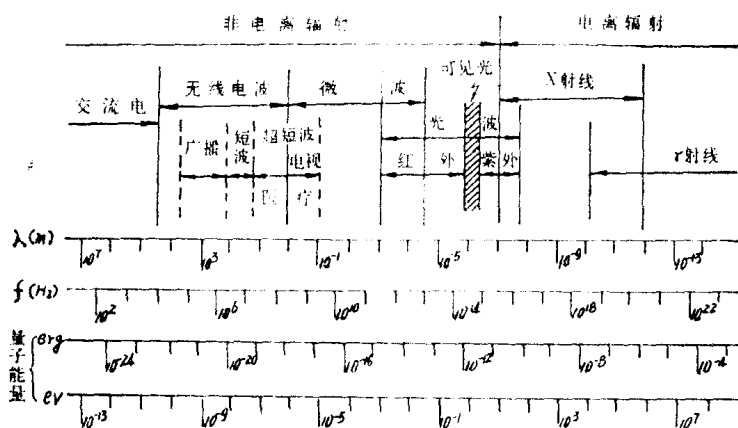


图 1-1

从图 1-1 可以看出，当频率高于光波时，量子能量可达很大值，如 x 射线，象这样大的量子能量足以使分子产生电离；反之，当频率远低于光波时，量子能量很小，它不能使分子产生电离，如常用的微波频率 ($300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$)，其量子能量只有 $4 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ 电子伏特。因此在频谱上，我们把频率高于 $3 \times 10^{16} \text{ GHz}$ 的电磁辐射称为电离辐射，把频率低于 $3 \times 10^{16} \text{ GHz}$ 的电离辐射，包括红外、微

波、射频在内，均称为非电离辐射。

对生物组织来说，电离辐射的危害性很大。因为造成危害的主要是量子能量，而不是总能量。因此即使在低电平照射下，它也会产生积累效应，造成对生物组织的破坏与损伤。所以一旦人体吸收了电离辐射的危险剂量后，将产生无法测到的温升，造成死亡。通常人们所说的“辐射危害”，就是指这种电离辐射。

非电离辐射的量子能量不足以破坏分子。这种辐射的特点是：粒子性隐，波动性显，并以电磁性为其主要特征。鉴于非电离辐射的这些本质特性，因此它对生物体组织的破坏与损伤，应取决于其总能量，即必须在高功率电平和一定的照射时间条件下才发生。另一方面，正由于这种辐射的电磁性，因此在生物体中能产生诸如电介泳力 (dielectrophoretic forces) 效应、压电效应、霍尔氏效应 (Hall effect) 以及超导电效应等，使生物体在没有明显温升的情况下，导致神经系统和心血管系统等功能紊乱。通常人们所说的“电磁辐射危害”就是属于这类非电离辐射。关于电磁辐射的危害，将在本书第二篇中讨论。

§ 1-3 电磁泄漏与辐射

大家知道，根据设备用途不同，大功率射频及微波设备可以分为两类。一类是目的在于向空间发射无线电波的设备，如广播机、电视发射机、雷达、制导设备、微波中继通讯设备、卫星通讯设备以及其它无线电发送设备等。在这类设备中，向空间发射电波正是设备所需要的。因此一般都需要装设发射天线，使无线电电波尽可能高效率地辐射出去。显然，在这类设备的天线附近，电磁场是非常强的。另一类

是以利用电磁能为目的的设备，如高频感应加热设备、高频介质加热设备、微波加热设备、微波热疗治癌设备等。这类设备只要求在有限区域内辐射电磁波或送发电磁场，不要求向空间发射电波，因此不需要装设发射天线。为了减少杂散电磁场向空间泄漏，尽可能采用有限尺寸的电磁辐射器以及和设备系统相匹配的感应线圈或工作电极。但是，由于辐射器、感应线圈或工作电极毕竟是在空间辐射电磁波或散发电磁场，因此不可避免地会出现一些杂散漏场，加上它们和设备系统也不能做到完全的匹配，从而在馈线上出现了驻波。所以在辐射器、感应线圈或工作电极附近，仍然还会存在有较强的电磁场泄漏与辐射。

另外，就设备本身而言，不论是那一类设备，只要没有采取妥善的屏蔽措施或将设备机壳散开，则在设备附近（这些部位通常是机器操作人员的工作场地）将会出现较大的电磁场泄漏与辐射，其数量级往往也会超过所规定的电波辐射安全卫生标准。

为了能够对电磁辐射的危害采取积极有效措施，必须首先要弄清这些电磁辐射的性质与特性。在第一篇中，我们将着重讨论这问题，并从基本的电磁现象着手，以便建立一个较完整概念。

第二章 静 电 场

§ 2-1 库仑定律

众所周知，被毛织物摩擦过的琥珀能吸引纸屑、头发等轻微物体。我们称这种现象为“带电现象”。物体有了这种

吸引轻微物体的性质，我们说它带了电，或者说它有了“电荷”。物体所带电荷的多少称为“电量”。这种带了电的物体，称为“带电体”。

1747年，美国科学家富兰克林把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫做“正电荷”，把用毛皮摩擦过的胶木棒所带的电荷叫做“负电荷”。

实验证明：在自然界中，只存在正、负两种电荷，而且同性电荷互相排斥，异性电荷互相吸引。

电荷之间所以能相互排斥、相互吸引，说明它们之间存在有一种力。库仑定律指出：在均匀无限的媒质中，两个带电体（带电体与距离相比为极小）之间的这种作用力大小是和它们的电量乘积成正比，和距离的平方成反比，如图 2-1 所示。

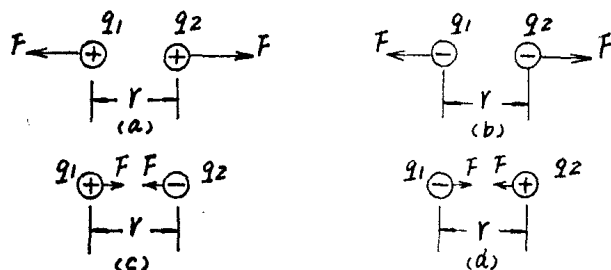


图 2-1

若用公式表示，则

$$F = A \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

式中 F 表示作用力，单位为牛顿；