

不
竟
也
磁
工
程
学

HUANJINGDIANCI
GONGCHENGXUE

环境电磁工程学

赵玉峰 编著

50.9513/378
成
书

化学工业出版社

环境电磁工程学

赵玉峰 编著

化学工业出版社

内 容 提 要

电子设备在工作中所形成的电磁辐射,构成了对人类生活环境的严重污染和对人体健康的较大威胁,电磁污染已被列为公害之一。因此,为了研究和解决电磁污染问题,形成了一门新型的科学——环境电磁工程学。

本书从环境电磁工程学基本概念出发,分析了污染环境的电磁辐射场源、污染途径,并对电磁辐射危害作了简要介绍。在此基础上,重点对电磁辐射的抑制技术与电磁辐射强度的监测技术作了比较详细、明了的介绍和论述。同时,结合实验,论述了屏蔽与接地技术设计原则。对从事电子设备的设计和制造的工程技术人员;从事环境保护和劳动保护的工作人员;从事劳动卫生和职业病工作的医务人员以及机械制造、交通铁道、轻工食品、石油化工、冶金、无线电广播、微波加热等行业的有关人员有一定参考价值。此外,还可以作为有关院校的教学参考书。

环境电磁工程学

赵玉峰 编著

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $8^{2/3}$ 插页1 字数184千字 印数1—3,500

1982年10月北京第1版 1982年10月北京第1次印刷

统一书号15063·3419 定价0.90元

序

环境问题，是社会发展到现阶段的必然产物。人们为了生存和改善物质生活条件，不断地提高自己改造和利用自然环境的能力，而随着人们驾驭自然能力的增长，发展到一定阶段，却会带来对环境的污染和生态的破坏。这就是通常所称的“公害”。在六十年代，“公害”曾经使一些发达的资本主义国家大为恐慌。但是，人们的实践活动是永远前进的，又不断地探索控制和利用污染物的新途径，研究如何更合理地利用自然资源。这就产生了环境保护科学。环境保护这门科学涉及面很广，在我国尚处在新兴阶段，它研究的内容也还在不断发展。而环境电磁工程学，则是环境保护学科中更比较新的一支。电能的应用，给人们的物质生活带来很大的方便，但也带来了电磁辐射的污染。随着时间的推移，这种污染造成的后果也越来越明显，近些年已引起人们的重视。电能的利用仍将不断地继续发展，电磁辐射问题也将越来越大。因此，研究如何更合理地利用电磁波，防止它对环境危害，是摆在我们面前的迫切任务。本书的作者，在这方面进行了有成效的探索，为我国环境保护科学补上了一个缺门，为更深入，广泛地研究这门科学打下了很好的基础，我相信我国的电磁工程学以此为开端将有更大的发展。

北京市环保局副局长

高宇声

36943

绪 言

回忆往事是很有趣味的，也是发人深思的。早些时候，一位住在某塑料门市部附近的朋友告诉我：他才买来不久的电视机已到“门诊部”看了两次“病”，而每次都是以“无病”而归。出于职业上的好奇心，我走访了这个塑料门市部，一眼就看到并排放在柜台里面的六台塑料热合机，心里自然明白了许多。一了解，果然是塑料热合机搞的“鬼”。原来，由于加工任务繁重，这个门市部工作分成三班倒，因此塑料加工正恰好与看电视时间吻合，塑料热合频率的基波与谐波都构成了对电视信号的干扰。所以，电视机在他家就“生病”，到了“门诊部”由于远离塑料加工门市部而就“无病”了。又有一次，我出差到某电台，领导讲了这个电台附近的老家家点了“高周灯”，照明不花钱。据说这是在上海教中学的一位老师发明的，很快就推广开了。领导报怨这样下去会影响广播服务效果，希望有关部门解决。听了这段趣谈，我一方面表示点“高周灯”的发明实在是有些荒唐，万不可推行；另一方面也深感电磁污染的严重性，已到了非解决不可的地步了。

故事已经成为过去的事了，然而故事本身却说明了一个本质问题，这就是在人类的社会生活中，由于科学技术的不断发展与提高，电磁能被广泛地运用在国民经济的各个部门和日常生活领域之中；与此同时，电气设备成为社会生活的重要成分，促进了社会的前进。随着电磁能利用范围的扩大与利用能量的日益提高，存在于地球上的电磁波不断地增大，而且频带极宽。这种电磁波与宇宙杂波相比较，对人类的

社会生活和国民经济有着巨大的影响。它不仅直接影响到各个领域电子设备的正常工作，使之信息失误、控制失灵，而且还影响到广大居民的电视机和收音机的视听；更为严重的是，在大强度的电磁辐射长期作用下，可使人体健康受到影响并有程度不同的危害，以致造成环境污染，即所谓的电磁烟雾。

电磁烟雾以及由电磁烟雾所引起的电磁污染问题，引起了人们的日益重视，正在研究和运用工程技术手段来解决种种电磁干扰与危害问题，力图减少或消除污染。为此，新兴的环境电磁工程学就是近一、二十年来新创立的一门边缘学科，在电磁与电磁控制领域内进行广泛而深入地研究与探讨。

环境电磁工程学，也叫环境电磁兼容学（EMC）。这一门学科一经创立，将以极快的速度发展着，造福于人类。为了促进这一科学的不断发展，保护环境、消除干扰与危害，笔者结合多年来的研究与实践，写了这本《环境电磁工程学》，供有关专业人员与研究设计部门工作中参考；也可以作为某些院校的教学参考书。

在编写过程中，得到北京市环境保护局领导和专家的热情关怀和具体指导；“全国高频防护研究协作组”的诸位先生审阅了部分初稿；北京市环境保护局的向百琴同志和北京市劳动保护科学研究所的于燕华同志为此提供了许多宝贵文献资料，并做了补充。特别应提及的是北京市环境保护局高宇声副局长在百忙中，对全书进行了审核，并为本书作了序。在此笔者一一深表谢意。

由于笔者专业知识所限，加之时间仓促，书中错误在所难免，诚望读者批评指正。

赵玉峰

目 录

序

绪言

第一章 环境电磁工程学概论	1
第一节 环境电磁工程学基本概念	1
第二节 环境电磁工程学的若干术语	8
第二章 人工杂波与场源	12
第一节 概论	12
第二节 放电所致杂波	15
第三节 射频辐射	24
第四节 工频电气干扰杂波	31
第三章 电磁辐射的传播与干扰	33
第一节 概论	33
第二节 辐射干扰与传播	34
第三节 线路干扰与传播	37
第四章 电磁辐射的危害	40
第一节 射频电磁场的作用机制	40
第二节 射频电磁场对人体的影响与作用因素	43
第三节 射频辐射的干扰危害与引燃引爆危险性	50
第五章 静电屏蔽与静磁屏蔽	52
第一节 静电屏蔽原理及其屏蔽效能	52
第二节 静磁屏蔽及其屏蔽效能的计算	54
第六章 电磁屏蔽原理	59
第一节 屏蔽的目的和种类	61
第二节 射频电磁场磁场分量的屏蔽原理	63

第三节	射频电磁场电场分量的屏蔽原理	66
第四节	屏蔽材料的吸收效应	68
第五节	屏蔽材料的反射效应	70
第六节	理想电磁屏蔽效能公式	72
第七节	金属板的电磁屏蔽效能计算	75
第八节	金属网屏蔽效能计算	81
第七章	屏蔽与接地技术	91
第一节	屏蔽材料的选择	91
第二节	屏蔽体的设计	97
第三节	射频接地	99
第八章	电磁屏蔽室	105
第一节	电磁屏蔽室概论	105
第二节	屏蔽室屏蔽效率计算	108
第三节	双层电磁屏蔽	115
第四节	屏蔽室结构对屏蔽效能的影响	116
第五节	电磁屏蔽室结构设计	125
第六节	屏蔽室屏蔽效能的测试	133
第九章	其他干扰的抑制措施	139
第一节	线路干扰的抑制措施	139
第二节	电气干扰的抑制	140
第三节	放电噪声干扰的抑制	141
第十章	屏蔽的谐振及其避免	143
第十一章	微波漏能的抑制与吸收	148
第一节	漏能抑制技术概述	148
第二节	漏能抑制器的特性与工作原理	153
第三节	微波吸收材料	156
第四节	吸收方案的设计	164
第五节	微波辐射的个体防护	166
第十二章	滤波器	169

第一节	滤波器的定义与分类	169
第二节	滤波器的传通条件	172
第三节	几种类型的滤波器	174
第四节	电源滤波器的设计与安装	183
第十三章	区域控制与绿化	188
第一节	区域控制	188
第二节	绿化	189
第十四章	电磁环境的监测技术	191
第一节	远区电磁场和近区电磁场的测量特点	191
第二节	高频电磁场近区场强测定仪	196
第三节	高频电磁场近区场强仪的使用方法与测定规范	215
第四节	干扰场强测量仪	219
第五节	微波漏能测试仪及其使用	228
第十五章	场强测量仪的标定技术	241
第一节	高频电磁场近区场强仪的标定技术	241
第二节	远区场强仪标定技术	248
第三节	微波场强仪与微波漏能仪的标定技术	254

第一章 环境电磁工程学概论

第一节 环境电磁工程学基本概念

一、起因与由来

一提起环境，人们就会自然而然地想到空间，人类赖以生活的自然界。在人们生活的空间里，到处都有电磁场分布着，有电磁作用到人与生物以及电子敏感设备上。在人类的长期生活实践中，逐渐发现有用信号与干扰信号的对抗问题，比如电子设备工作时，往往在有用的信号电压之外还产生某些令人头痛的干扰电压；空间电波噪声直接干扰某些设备的正常工作与通讯联络。为了解决对抗问题，1934年世界上成立了“国际无线电干扰特别委员会”（CISPR）。这个委员会根据研究对象与工作内容之别，又分成六个分委员会，组织机构列于表1-1。

CISPR建立后，首先在测定方法、干扰标准与抑制技术上，进行了长时期的研究，重点探讨了电子设备与电气设备处于共存，互不干扰的条件，并取得了进展。

1958年，以“射频干扰（G-RFI）”名称组织起来的机构则将“电气与电子工程师协会”（即IEEE组织）所命名的G-EMC叫做无线电干扰。1964年又将G-EMC改称为EMC。从而，几经推敲后，将“电磁兼容性”扩展到更加广泛的领域之中，同时将EMC做为电子装置与电气设备互不干扰，相互共存的专用语了。

表 1-1 CISPR分委会分工表

分委会	工 作 对 象 与 内 容
A	检测方法、检测仪器
B	高频设备(ISM)、检测法标准
C	高压线、发电站、变电站及某些电源
D	内燃机车、专用电气设备
E	与电视机、收音机接收装置的关系
F	所有家用电器

随着电气设备功率的不断提高,人们又发现了电磁辐射给环境所带来的污染与危害问题,直接影响到人体健康。为此,某些国家在比较广泛的频段上,比如苏联在中短波、美国在微波方面,研究电磁辐射对机体的影响,寻找人和生物与电磁之间的关系,确定人与电磁场共存的互不干扰的条件。目前,电磁辐射对机体的影响和如何从电磁场的有害作用下,保护人以及生物的问题,作为一个极其重要的基础问题而给予高度的重视。一些国家相继于五、六十年代提出和制定了若干频段的射频辐射安全卫生标准。

凡此种种,都需要研究和创造一个和谐的环境,提供一个共存的条件,这就是环境电磁工程学形成的起因与由来。多少年来,它吸引了众多的有志者,花费了巨大的精力,采用了物理的、化学的、机械的理论与工程技术手段,进行了深入地研究。

二、环境电磁工程学的定义

综上所述,环境电磁工程学是研究电磁辐射与辐射控制技术的科学;换言之,环境电磁工程学是研究由于电磁能的广泛应用而产生的辐射干扰与污染的变化规律,实行检测的

技术手段、测试仪器与测量方法；探讨正常信号与干扰信号共存的条件；制定干扰允许标准和电磁辐射安全卫生标准；进而研究防止电磁干扰与辐射污染的控制技术的科学，它是一门涉及到工程学、物理学、医学、无线电学以及社会科学等多方面学科的综合性科学。

三、环境电磁工程学的研究内容

现代的科学技术演变的愈来愈加复杂化了，环境电磁工程学所涉及的范围是如此之广，研究的内容是如此之丰富，很难用几句话说清楚，何况这一学科还处于创立时期，许多内容尚不得预见。尽管如此，环境电磁工程学的研究内容的初貌还是可以给出的。比如，IEEE的G-EMC学报中，对环境电磁兼容学的研究领域作了这样的概括：（1）研究电磁检测方法和防止电磁干扰技术；以及有关仪器仪表设备的使用技术；（2）研究电子设备的灵敏度、衰减度以及兼容性技术；（3）研究若干干扰源及其特性……；再比如，惠特（White）所著《EMC手册》中指出：环境电磁学重点研究电子设备与电气设备共同存在的和谐条件，用图说明则有如下形式。

图 1-1 表明：在左圆内，A～E各设备均处于互相不干扰的状态下，即和谐状态。此时A～E各种设备都可以按着各自的设计要求进行正常工作，各种装置得到充分利用，其效能可以充分发挥。而在右圆内，由于工厂的高频设备F开始使用，F的电磁辐射将对环境发生影响，有可能破坏原来的和谐状态，从而使一些设备不能正常工作，发生差错。若对F采取妥善措施，使其辐射被抑制在有限范围之内，那么就可以避免F对其他设备的干扰；同时也可以防止其他设备

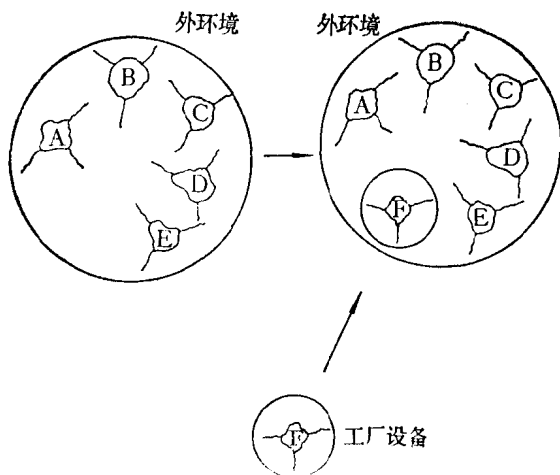


图 1-1 环境电磁工程学示意

图例：A、B、C、D、E各表示电气设备或电子设备，诸如通讯设备，收发报机，雷达，广播机，飞机，汽车，电子仪表等等；F表示工厂的高频设备

对F的影响，实现了在新的环境中互不干扰、互不影响的新的和谐状态。

结合多年的研究实践，我们可以对环境电磁工程学的研究内容作如下概括：

（一）研究由于电磁能的利用范围不断扩大和不断发展所带来的变化；

（二）研究电磁辐射在环境中的分布特点与规律和电磁与高温、高湿、放射性等多项的作用；

（三）研究电磁场对人体的危害和对武器装备、可燃性油类等的潜在危险性；

（四）研究电磁辐射所引起的工业干扰及其干扰特性；

（五）研究电磁场强度测定仪器、标准计量理论以及检

测方法与操作技术；

（六）研究电磁和谐的条件，制定工业干扰与射频辐射安全卫生标准；

（七）研究电磁辐射作用区域，探讨电子敏感仪器、导弹等武器装备以及燃性油的安全放置位置与距离；

（八）研究抑制技术与防护方案；

（九）研究与上述内容相应的理论。

四、射频电磁场

射频电磁场对环境的污染十分严重，因此这里重点介绍一下它的基本概念。

（一）电磁场

一切物体都是由大量的和分立的微小粒子所组成，这些粒子有的带正电，有的带负电，也有的不带电。所有粒子都在不断地运动，并被它们以一定速度传播的电磁场所包围着。由此可知，带电粒子及其电磁场不是别的，而是物质的一种特殊形态。物质存在四态，即固态、气态、液态与场态。

电磁场是指变化的电场与磁场的组合，电场与磁场互为因果，互相依存，不可分割的。电磁场的正确含义是任何交流电路都会向周围的空间里放射电磁能，形成有一定强度的电力与磁力作用的空间，这个有场作用的空间称为电磁场。

电场（E）与磁场（H）的存在是这样的：若某一空间区域内有变化的电场或变化的磁场存在，那末将在其临近的区域内引起相应的变化磁场或电场，而这个新产生的变化磁场或变化电场，又将在较远区域内引起新的变化电场或变化磁场。这种变化的电场与磁场交替地产生，由近及远，互相

垂直，并与自己的运动方向垂直的以一定速度在空间内传播的过程，称为电磁辐射。

电磁辐射可类比于水波，当我们向河中扔一块石子，就会在石子入水处形成中心，以此中心向四周围传播，如没有损耗可无限远地传播下去。电磁辐射在空间传播，因空气及空间物体的吸收作用，同样也只能传播到有限范围之内。

应当指出，一同存在于某一空间里的静电场和磁场，它们彼此之间并不发生任何关系，而只是各自独立变化。这种彼此不相关的电场与磁场共同存在的空间，不能叫电磁场的。

以辐射形式出现的电磁场，也称作电磁波。场源与电磁波的关系主要有：

1. 在场源或与场源相连接的导体附近，存在着束缚电磁波，其特点是束缚电磁波的能量不仅在电场与磁场之间互相转移、交替作用，而且还受场源与导体上电荷和电流的制约，从而使电磁能量与场源发生相互交换作用；也就是说，束缚电磁波可以使场源所发射出去的能量有一部分要不断地返回场源。

2. 在距场源或与场源连接的导体很远的空间里，存在着自由电磁波。它的电磁能量基本上不受场源的控制，从而使其按一定速度不断地向远方传播，传播方式完全是辐射的。

除以辐射形式出现的电磁场之外，在场源或与场源有电气连接的导体附近的空间，大量存在的是电磁感应场。电磁感应场与场源密切相关，它不能脱离场源而独立存在。

电磁波的性质有：

1. 在远离场源的地方， E 与 H 均作正弦或余弦函数的

周期性变化，它们的周相相同，在量值上有 $\sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H$ 。

2. E 与 H 互相垂直，而且又都与传播方向垂直。

3. 电磁波在真空中的传播速度为

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

4. E 与 H 的振幅均与频率的平方成正比。

(二) 射频电磁场

任何交流电路都会向其周围的空间放射电磁能，形成交变电磁场。当交流电的频率达到每秒钟十万次及其以上时，交流电路的周围便形成了射频电磁场。

射频电磁场为非电离辐射，任何射频电磁场的发生源周围均有两个作用场存在着，即以感应为主的近区场（又称感应场）和以辐射为主的远区场（又称辐射场）。它们的相对划分界限为波长的六分之一处。

射频电磁波按其频率不同又可分为三类，即高频、超高频与特高频。它们的大致划分界限示于下表中。

表 1-2 射频电磁波（场）分类

名 称	波 长	频 率
长 波	>3000米	<10 ⁵ 赫
中 波	300~200米	10 ⁵ ~1.5×10 ⁶ 赫
中短波	200~50米	1.5×10 ⁶ ~6×10 ⁶ 赫
短 波	50~10米	6×10 ⁶ ~3×10 ⁷ 赫
超短波	10~1米	3×10 ⁷ ~3×10 ⁹ 赫
微波 { 分米波	1~0.1米	3×10 ⁸ ~3×10 ⁹ 赫
厘米波	10~1厘米	3×10 ⁹ ~3×10 ¹⁰ 赫
毫米波	<1厘米	>3×10 ¹⁰ 赫

在电磁波中，长波、中波、中短波的电磁传播，在行进过程中遇有一般大小的物体时将发生绕射；但随着频率的增加，电磁波的性质就越来越和光相似，沿直线传播，且具有反射与折射的性质。

第二节 环境电磁工程学的若干术语

正象度量中长度的单位，如公里、米、厘米……在世界上有一个统一的术语那样，环境电磁工程学也应当具有它自己的专用术语，以便在世界各国进行共同的研究探讨和学术交流中，有共同的概念和语言，方便理解和记忆，加速这门学科的发展。

但是，到目前为止，电磁环境方面缺乏统一的术语，世界上各国所使用的术语五花八门，相当混乱。就国内而言，在电磁场方面的术语与频率分类等等，也不一致，有关的几个部门各自依据工作上的方便规定了相关术语与频段。所有这些，造成了不必要的麻烦，使相互理解与交流发生一定困难，有碍环境电磁工程学的深入研究与发展。

为此，参照若干资料与研究报告，我们对有关术语进行了研究整理，提供如下，供有关单位参考，并进一步检验这些术语的准确性。

一、自然杂波

这种杂波来自于自然界，由于自然界某些自然现象所引起的，所以有些国家称做宇宙杂波。

自然杂波中，以天电所致杂波为主。由于自然界发生某些变化，常常在大气层中电荷电离，并且发生电荷蓄积，当达到一定程度后可引起火花放电。这种在放电过程中所引致