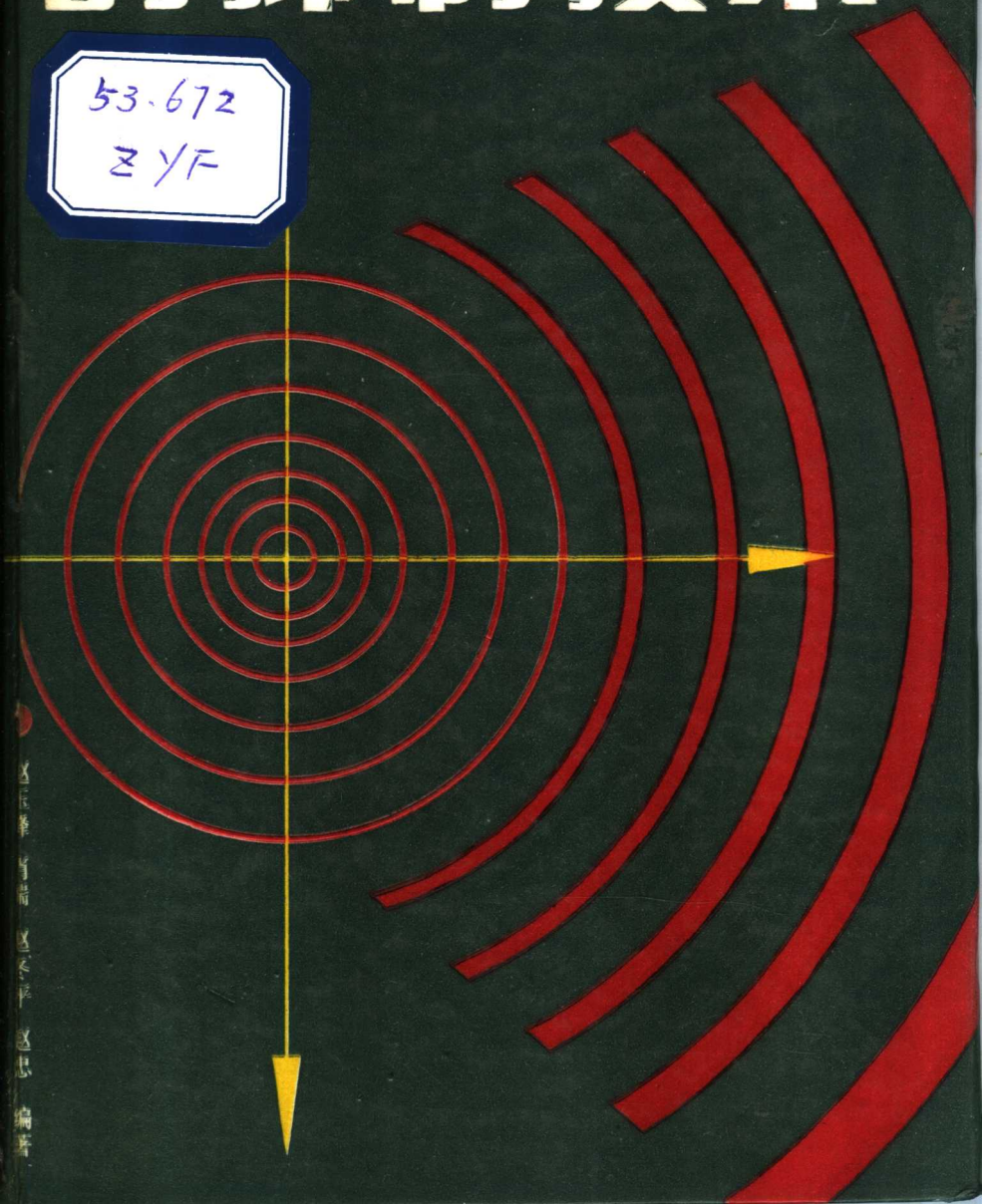


电磁辐射 的抑制技术

53.672

ZYF



电磁辐射抑制技术
张元芳 编著

电磁辐射的抑制技术

赵玉峰 肖瑞 编著
赵冬平 赵忠

中国铁道出版社

1990年·北京

内 容 简 介

环境污染是当今严重的公害，高频电磁污染在科学技术现代化的过程中也在日趋严重。实践告诉我们，随着工业的发展污染的治理必须同时进行。本书对高频电磁场的产生，近区场强度的测定技术及其计算，高频电磁场的干扰抑制以及近场防护技术作了比较全面的介绍。由于这是一项边缘科学，工作起步又较晚，资料较少。所以出版这方面的书籍，将有助于推动高频电磁技术的发展。

本书可供广大劳动保护、环境保护、劳动卫生等专业人员和电子行业、邮电系统、广播电视部门、城建部门等广大专业人员阅读参考，也可作为专业院校的教学参考用书。

电磁辐射的抑制技术

赵玉峰、肖瑞、赵冬平、赵忠 编著

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 张余昌 装帧设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 $\frac{1}{4}$ 印张，15 字数：337 千

1989年12月 第1版 第1次印刷

印数：1—1000册 定价：9.15元

ISBN7-113-00556-X/X·1

序

电子技术的高速发展和电子设备的广泛应用，推动了生产建设事业的发展 and 人民物质文化生活的不断提高。然而，任何射频设备工作时，总是要不断向四周空间发射和泄漏电磁能量，污染作业环境及居民环境。当前，强场辐射对作业人员、武器弹药、可燃性气体、油品、电子仪器和控制系统的影晌和危害问题，已经成为世界上许多国家研究的课题。

在我国，党和国家对于从事射频作业人员的身体健康，防止“电磁烟雾”污染环境，保障作业人员与居民的健康，给予了高度重视。为了研究射频电磁辐射在近区场内的感应特点以及在较远场内的辐射状况，确定电磁场强度的分布规律和对人体健康的有害作用，进而研究出有效的屏蔽技术和抑制方案，中央广播电视部、铁道部、电子工业部、邮电部、劳动人事部、卫生部、中华全国总工会、北京市、天津市、沈阳市、杭州市、南京市、广州市等中央主管部门与有关省市及其所属工厂企业，科研设计单位和大专院校等开展了深入的实验研究工作。特别是北京劳动保护科学研究所，在过去的十多年中进行了大量的科学研究工作，培养和建立了一支骨干队伍，在近场防护研究上形成了自己的特色，取得了很大成绩。

为了指导科学研究和开展射频防护工作，在过去一段较长时期里，许多主管机关和专业技术部门及广大科研技术工作者，迫切要求我国出版一本电磁防护近场抑制的专门著作，以适应迅速掀起的研究与治理高潮的急需。为此，我们

请电磁防护专家、北京劳动保护科学研究所电磁研究室主任、北京环境物理污染控制研究中心二室主任、中国电工技术学会电磁专业委员高级工程师赵玉峰等写了这本书。

《电磁辐射的抑制技术》一书，从近区场观点出发，论述了电磁辐射的基本概念；分析并探讨了场强测量理论与实践技术；阐述了射频频近区场屏蔽原理与屏蔽设计中的若干问题；讨论了其他干扰的抑制技术与高层建筑的遮蔽问题。作者在科学研究基础上，从理论与实践相结合的观点出发，做了深入浅出的论述，文字通俗易懂，内容实用可靠，对于研究和治理均有一定的指导意义。它是目前我国论证电磁辐射近场抑制技术的第一部专著，现推荐给广大读者，供广大劳动保护、环境保护、劳动卫生等专业人员和电子行业、邮电系统、广播电视部门、城建部门等各个领域内的科研、设计、生产与使用的广大专业人员阅读和参考，亦可作为专业院校的教学参考用书。

我们推荐此书的目的，是希望广大科研设计部门、工厂企业以及有关主管机关和同行们共同努力，消除危害环境的电磁烟雾，切实做好保护作业人员与居民身体健康，保护环境，造福于人民的工作。当然，作为一部新著作，难免有论证不当之处，尚请有关专家、读者指正。

铁道部科学技术馆副馆长
吴志民

前 言

近年来，电波技术及射频电子设备发展十分迅速，应用日益广泛。在通信、广播电视、国防、测量、控制、工业、科学、农业和医疗等系统中都有大量的应用。可以说，在国民经济的各个部门，即在产业、经济、文化的广大领域中，乃至每个家庭的日常生活中，电波无时不在、无所不在。随着科学技术的不断提高，电波技术与电子设备的生产和应用必将日益发展，永无止境。

与此同时，由于电磁辐射和泄漏，电磁能量通过空间传播及线路传导等多种形式，施加于人体、生物体以及仪器设备上，因而出现许多异常现象。特别是当其辐射场强或干扰电压超过规定限值多倍情况时，电磁辐射与泄漏等将造成电磁污染、危害人体健康、干扰和破坏生态平衡、干扰有用信号的传输以及发生引燃引爆。

因此，高效地抑制电磁辐射，防止污染，有效地实行电磁兼容，创造和谐的电磁环境，是当务之急。在这方面，仅有一般的电磁技术理论和远场屏蔽技术的基础知识，是不够的，很难理解和有效地实施电磁近场防护和抑制，欲做出正确的评价也是困难的。为了充实这方面的知识，尤其是从理论上做进一步的讨论与论述，我们编著了此书。

本书虽然从理论上做了较大量的论述，但尽量避开了复杂的公式推导，这样既可以在实际工作中有效地运用，也可以使具备一定专业知识的技术人员更进一步的引伸。本书如能达到上述目的，帮助广大读者、特别是我的同行们增加一

点知识，对电磁抑制与治理工作起到一些推动作用，进而对近场防护技术与理论有微薄的贡献，实为编著者的无比喜悦与欣慰。

本书的编著，得到了许多领导和专家们的指导与补正。铁道部有关部门与技术专家对全书进行了详细审查和修改；北京劳动保护科学研究所的领导与专业研究人员都对全书作了有益指正；出版社领导与编辑给予了大力支持与修改。本书在写作过程中，参考和部分引用了某些技术报告等资料。在此书出版之际，我愿表示衷心的感谢！特别是对吴志民副馆长、于燕华工程师、童志伟副研究员等的热情协助与指导，作者谨致以深忱的谢意！

由于近场问题涉及到许多学科的理论问题以及技术实践问题，加之这一学科领域刚刚形成，若干学术问题还处于研究探讨之中，因此，本书缺点与错误在所难免，诚望广大读者和同行专家批评指正，作者将不胜感激那些给予本书赐教的人们。

我愿将此书作为第一本从学术理论与技术实践角度相结合的近场著作献给祖国和人民！

赵玉峰

目 录

第一章 电磁辐射污染与安全标准	1
第一节 电磁感应.....	1
第二节 电磁场与电磁辐射污染.....	10
第三节 广播的电磁辐射污染.....	19
第四节 工业、科学和医疗射频设备的 电磁辐射污染.....	31
第五节 电机的电磁辐射污染.....	39
第六节 电气化铁道的电磁污染.....	45
第七节 电磁的生物学效应.....	50
第八节 电磁辐射对生物体的作用机制.....	57
第九节 电磁辐射对人体健康的危害和影响.....	64
第十节 射频干扰及感应危害.....	73
第十一节 电磁辐射安全控制标准.....	76
第二章 电磁辐射强度的测量技术与场强计量技术	87
第一节 近区场强度测定理论.....	87
第二节 小天线的输入阻抗和有效长度.....	101
第三节 高频电磁场近区场强测量仪.....	133
第四节 甚高频电磁场近区场强测量仪.....	162
第五节 微波漏能测量仪.....	172
第六节 场强标准计量技术.....	183
第七节 电磁辐射近区场强测量技术.....	194
第八节 电磁辐射环境污染场强测量技术.....	213

第三章 电磁场强度的计算	238
第一节 本章所涉及到的物理函数的物理意义	239
第二节 静电学的位函数与稳态磁场的矢量磁位	244
第三节 电磁场的矢位	249
第四节 电磁场方程及其分析	252
第五节 环境电磁辐射场强实用计算公式	259
第四章 电磁抑制原理与计算	265
第一节 静电屏蔽原理	265
第二节 磁场屏蔽与屏蔽效能的计算	271
第三节 电磁屏蔽原理	276
第四节 电磁屏蔽效能的计算	288
第五节 金属板的电磁屏蔽效能计算	302
第六节 金属网屏蔽效能计算	308
第七节 屏蔽的谐振及其避免	326
第五章 线路干扰抑制与滤波器	330
第一节 线路干扰及其抑制办法	331
第二节 滤波器的定义与分类	334
第三节 滤波器的传通条件	336
第四节 滤波器的设计——计算法	338
第五节 滤波器的设计——图解法	356
第六节 电源滤波器的设计	361
第七节 滤波器设计与应用小结	366
第六章 电磁辐射的抑制与防护	367
第一节 射频设备的漏场抑制	367

第二节	屏蔽技术	377
第三节	屏蔽体的设计	386
第四节	接地与接地系统	396
第五节	屏蔽室的设计与设计举例	411
第六节	屏蔽室屏蔽效能的测试	425
第七节	其他电磁干扰的抑制技术	445
第八节	微波防护	454
第九节	建筑物电波干扰及其防止	457
附 录	461
§ 1	分贝与分贝表	461
§ 2	微波吸收材料	464
主要参考文献	469

第一章 电磁辐射污染与安全标准

科学技术和电子工业的迅速发展，为电磁学这门新学科开辟了广阔的实践前景。多少年以来，雷达系统，电视和广播发射系统、通讯系统、微波加热系统、射频医疗设备、射频感应及介质加热设备、各种放电加工设备等的数量，一直以神话般的速度在增长着。目前，许多国家都有成千上万个这类电磁辐射源在工作着，并且将以更高的辐射电平进行发射与作业。这些场源的辐射充满了整个环境（生产作业环境及居民生活环境），从而造成了一定程度的电磁辐射污染，形成公害。

通常，电磁辐射是摸不着、看不见、听不出、尝不到、嗅不着的，长时间一定强度的辐射可以产生意想不到的生理变化，同时对武器弹药、可燃性油品、电子仪器仪表以及通信控制信号等都存在着不同程度的危险性和干扰影响。应当指出：人们对上述影响的认识还是比较肤浅的，对面临的危害性也毫无所知，以致使人们置于无能为力的困境。为此，系统地对电磁辐射的物理概念、射频技术的应用与场源分析、电磁辐射的危害以及安全标准等给予叙述和介绍是非常必要的。

第一节 电磁感应

在奥斯特发现了电流产生磁场之后，不少科学家研究电流磁效应的“逆”效应，即能不能利用磁场来产生电流。这种研究导致了电磁感应现象的发现。

一、电磁感应

1831年，法拉第从实验中发现，当通过一个闭合回路所包围的面积内的磁通量发生变化时，回路中就会产生感生电流。由于磁通量的变化而产生感应电流的现象，称为电磁感应现象。

从本质上讲，电路中出现电流，说明电路中有电动势，电磁感应作用产生的应当是感应电动势，只有当电路闭合时感应电动势才会产生感应电流。

法拉第电磁感应定律描述了磁通量的变化和感应电动势的关系，他指出：无论什么原因，使通过回路面积内的磁通量发生变化时，回路中产生的感应电动势与磁通量对时间的变化率的负值成正比。也可以说，电路中感应电动势 ϵ 等于通过这个电路中的磁通量变化率的负值。用公式表示为

$$\epsilon = -k \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

式中 k —— 比例系数，如采用公斤秒米制，则 $k=1$ ，上式可简化为

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1-2)$$

若闭合电路的电阻为 R ，那么感应电流 I 为

$$I = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} \quad (1-3)$$

上式所给出的是单匝回路的感应电动势。若感应回路并非单匝，而是串联的 N 匝，那么在磁通量发生变化时，每匝之中都将产生感应电动势。设每匝中通过的磁通量都是相同的，则 N 匝线圈中的总电动势为

$$\epsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(N\phi)}{dt} \quad (1-4)$$

式中 $N\phi$ ——磁通量匝数。

通过上述分析可知：通过一个电路的磁通量，可以采用将电路压缩或扩张而使其发生变化，达到在该电路中产生一个电动势的目的。

电磁感应定律表明：只要穿过回路的磁通量发生变化，那怕是微小的变化，都必然在回路之中引起感应电动势，产生感应电流。这种作用可以解释为：电荷在变化过程中将受到一个沿回路环方向力的推动，即必须有一个力去推动电荷围绕电路运动，以便供给电荷能量用来补偿回路损耗（主要是发热损耗）。这种力来自一种场，就是电场。

例如，有一个半径为 r 的圆形回路环，其转轴方向上若有磁通量改变时，将在其周围建立一个场——电场。假使这个场为均匀场，那么在回路环上各点的大小都是等值的，即电场强度相等，且电场方向沿着回路。那么单位电荷围绕导线运动一周时所取得的能量为 $2\pi rF$ ，由于单位电荷做功 W 与单位电荷所受力 F 之间满足 $W = 2\pi rF$ ，所以可以导出下式

$$2\pi rF = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

从上式可以看出：回路的半径愈大，在环的周围所建立的电场将愈弱。

二、电磁振荡

电磁感应与电磁振荡在本质上是密切相关的，利用电磁振荡的最基本形—— LC 振荡就可以说明电场与磁场的依存和彼此转化的关系了。

以图 1—1 为例来说明：

若图 1—1 之 (a) 中的电容器 C 开始时带有电荷 q_m ，

而电感器中的电流 $i=0$ 。那么此时电容器所贮存的能量可由公式

$$v_c = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C} \quad (1-5)$$

求出。而电感器未贮存能量，其值 $v_i = 0$ 。

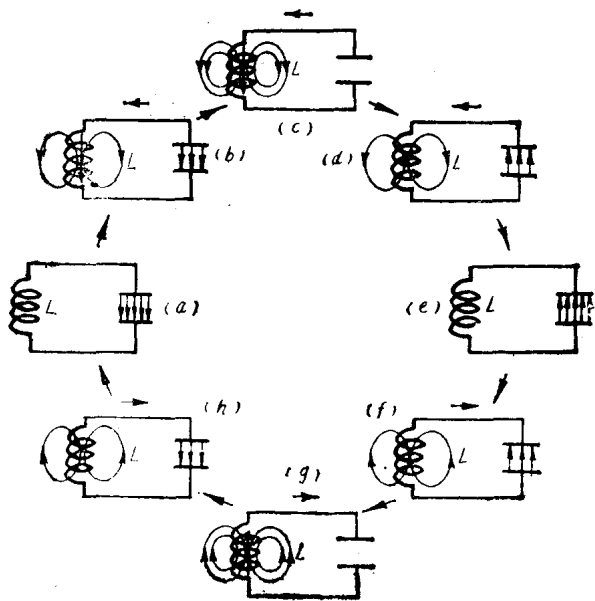


图 1-1 LC 振荡示意图

即刻，电容器开始放电，电感器中开始有电流通过， i 值可由 $\frac{dq}{dt}$ 求出， i 的方向指向下，如图 1-1 之 (b) 所示。

而磁能为 $v_i = \frac{1}{2} Li^2$ 。

随着 q 的减少，电容器的电场中所贮存的能量将相应减少，这部分减少的能量则转化为电感器所建立的磁场的能

量。这说明，电场的减弱，使之磁场建立并增强，能量由电能转化为磁能。一旦当电容器上的全部电荷完全消失，这时电容器中的电场为零，而电感器周围的磁场为最大，那么电场中所贮存的全部能量均转化为磁场能量，如图 1—1 之 (c) 所示。

上述过程如再进行下去，即电感器中的强电流继续把正电荷从电容器的上极板向下极板搬运，必然将建立新的电场，能量又从电感器向电容器流回，如图 1—1 之 (d) 所示。

到了图 1—1 之 (e) 所示时，电感器的磁场能量全部迁返给电容器的电场，但此状态时的充电方向与图中的 (a) 相反。

以下将沿着相反方向改变。电路总是必然恢复到它的初始状态，且以固定的频率循进。这就是所称的 LC 振荡。

理想条件下的 LC 振荡是一个无限的过程，能量始终在电容器的电场与电感器的磁场之间往复转化。但实际上， LC 振荡不是无限地持续下去，而是一个有限的过程。这是因为，电路中总是存在电阻，电阻将使能量以焦耳热形式从电路中损耗掉。

三、电场中的物质变化

(一) 电场中的导体

从物质的电结构来看，金属导体具有带负电的自由电子和带正电的晶体点阵。当导体不带电，也不处于外电场的作用范围之内时，自由电子的负电荷和晶体点阵的正电荷相互中和，则整个导体或其中任一部分都是中性的。然而，当导体处在外电场作用之下，导体中的自由电子（不论导体原来是否带电），将相对于晶体点阵作宏观运动，势必使导体上的

电荷发生重新排布,以至达到自由电子处于新的平衡状态。此时,外电场的电场力和导体上重新排布的电荷对自由电子的作用抵消,导体处于静电平衡状态。

在静电平衡状态下,导体内部任何一点的场强为零;导体表面上任何一点的场强方向垂直于该点的表面。从电位角度来看,在静电平衡条件下,整个导体为一个等位体,它的内部与表面各点的电位相等。当电位不同的导体相互接触后,由于电位不一将发生电荷运动,以致建立新的静电平衡状态。

当带电导体处于静电平衡状态时,导体内部没有净电荷存在,电荷只能分布在导体的表面上。带电导体的电荷一般是不均匀地分布在导体的表面上。若球形导体,其球面上的电荷分布是均匀的;若导体上具有尖端部分,在尖端处,电荷密度较大,场强也较强。

对于内部有空腔的导体,在电场作用下,导体内表面无净电荷,这个导体将起到隔绝外电场的作用,使外电场对空腔内空间不发生影响;若把导体接地,即使是空腔内存在有带电体所产生的电场时,对导体外部也不发生任何作用。上述这种现象通称为静电屏蔽现象。

(二) 电场中的电介质

从物质的电结构来看,每个分子都是由带负电的电子和带正电的原子核组成。正负电荷在分子中一般不集中在某一点上。

电介质有两类:第一类的分子在外电场不存在时,正负电荷的中心是重合的,这类电介质称为无极分子电介质。第二类是在外电场不存在时,分子的正负电荷中心不重合,这类电介质称为有极分子电介质。

在静电平衡条件下,电介质内部仍然会有电场存在,对于

两类不同的电介质,其极化过程是不同的:由无极分子所组成的电介质,例如 H_2 、 N_2 、 CH_4 等气体,在外电场作用下,分子的正负电荷中心将发生相对位移,形成电偶极子。这些电偶极子的方向沿着外电场方向,因此在电介质的表面上将出现正负束缚电荷,如图1-2所示。

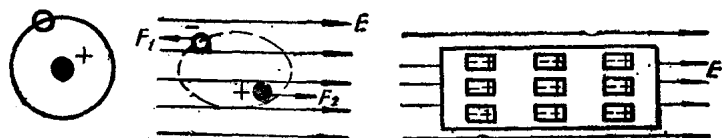


图1-2 无极分子的极化

从宏观方面分析,电介质中出现束缚电荷的现象,即为极化现象。外电场愈强,每个分子的正负电荷中心的距离愈大,分子电矩也愈大,所以电介质表面出现的束缚电荷也愈多,电极化的程度也就愈高。

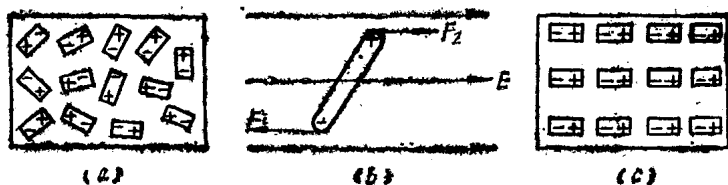


图1-3 有极分子的极化

有极分子组成的电介质,例如 SO_2 、 H_2S 等,虽然每个分子都有一定的等效电矩,但在没有外电场作用情况下,电矩的排列是杂乱的,整个电介质呈中性;一旦将电介质放在外电场中时,每个分子都将受到力矩的作用,使分子电矩发生向外电场方向转向的运动。由于分子热运动的结果,这种转向可能是部分的。外电场愈强,分子偶极子的排列也就愈