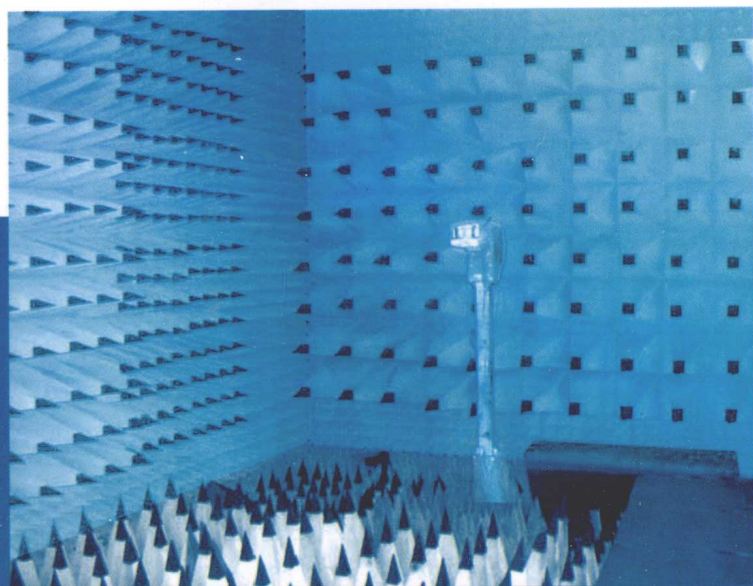


# 电磁辐射污染 及其防护技术

张月芳 郝万军 张忠伦 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 电磁辐射污染及其 防护技术

张月芳 郝万军 张忠伦 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2010

## 内 容 提 要

本书对电磁波的传输和危害机理、电磁辐射标准、电磁辐射监测方法等基础知识做了系统的介绍,并从电磁波屏蔽和吸收两方面出发,具体介绍了电磁波的防护原理、防护材料和工艺设计。

本书可供从事电磁辐射防护研究的科研单位及生产企业的工程技术人员参考,也可作为材料、环境学科的本科生和研究生的教材与参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁辐射污染及其防护技术/张月芳,郝万军,张忠伦  
编著. —北京:冶金工业出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-5024-5275-9

I. ①电… II. ①张… ②郝… ③张… III. ①电磁  
辐射—防护 IV. ①X591

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 099974 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 戈 兰 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5275-9

北京印刷一厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 6 月第 1 版, 2010 年 6 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 9 印张; 240 千字; 274 页

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

随着通信、电力、信息及家电产业的迅速发展，电磁辐射产生的电磁干扰（EMI）以及对人体健康的危害已经成为一个严重的社会问题。了解电磁辐射污染的现状，分析其发生机理及过程，评价电磁辐射的标准及对电磁辐射防护材料的研究和制备、探索如何实施电磁辐射污染防治具有现实意义。本书是电磁场与电磁波理论与电子、通信、材料、环境等学科的众多分支的一个交汇。电磁防护是二战以后一个新兴的研究方向，目前，无论是在军事上还是在民用上，各国都相继投入大量人力和物力进行广泛的研究，取得了很多成果，应该说电磁屏蔽吸收及其应用实践已经日趋成熟。但是，还有很多理论和技术问题有待解决。本书对电磁波的传输和危害机理、电磁辐射标准、电磁辐射监测方法等基础知识做了一个系统的介绍，并从电磁波屏蔽和吸收两方面出发，具体介绍了电磁辐射的防护原理、工艺设计及防护技术。

全书共9章，第1章介绍了电磁学的一些基础知识；第2章介绍了电磁辐射、电磁兼容的概念及电磁辐射的危害；第3章介绍了国内外电磁辐射的防护标准；第4章介绍了电磁辐射的检测方法；第5章介绍了电磁波吸收理论和基本计算方法；第6、7章介绍了电磁吸收理论，电磁波吸收材料及工艺设计；第8章介绍了用电磁屏蔽对电磁波进行防护的理论和

技术，最后一章着重介绍常用的电磁辐射污染防治技术和方法。

本书可作为材料、环境学科的本科生和研究生的教材和参考书，也可供从事电磁辐射防护研究的科研单位及生产企业的工程技术人员参考。

编 者

2010年4月

# 目 录

第 1 章 电磁理论基础	1
1.1 真空中的静电场	2
1.1.1 电荷的基本概念	2
1.1.2 真空中的库仑定律	3
1.1.3 电场强度	4
1.2 静电场中的电介质	5
1.2.1 电介质的极化	5
1.2.2 极化强度与极化电荷	6
1.2.3 电介质的极化规律	9
1.3 稳恒磁场	10
1.3.1 磁场	10
1.3.2 磁感应强度	11
1.4 磁介质	11
1.4.1 磁介质及其分类	11
1.4.2 磁场强度	13
1.4.3 铁磁质	15
1.5 麦克斯韦电磁场理论的基本概念	17
1.5.1 电磁场	17
1.5.2 电荷连续性方程	18
1.5.3 位移电流	20
1.5.4 麦克斯韦方程组	22
1.5.5 电磁波	24
第 2 章 电磁辐射及其危害	29
2.1 电磁辐射源	29

2.1.1	广播、电视发射设备	29
2.1.2	通信、雷达设备	30
2.1.3	工业、科学和医疗射频设备	30
2.1.4	机动车辆的点火系统	32
2.1.5	高压输电系统	32
2.1.6	电力牵引系统	33
2.1.7	家用电器	34
2.2	电磁波的应用	34
2.3	电磁干扰	36
2.3.1	电磁干扰的概念	36
2.3.2	电磁干扰分类	38
2.4	电磁兼容	39
2.4.1	电磁兼容的基本概念	39
2.4.2	电磁兼容涉及内容	39
2.5	信息泄漏	41
2.6	电磁辐射对人体的危害	42
2.6.1	电磁辐射对人体的危害	42
2.6.2	电磁辐射对人体的伤害机理	43
2.7	消除电磁污染的途径	46
2.7.1	电磁屏蔽技术	46
2.7.2	接地技术	46
2.7.3	电磁波吸收防护	47
2.7.4	线路滤波	48
2.7.5	远距离作业	48
2.7.6	个人防护	48
2.7.7	其他防护措施	48
<b>第3章</b>	<b>国内外电磁辐射防护标准</b>	<b>49</b>
3.1	国外现行的主要电磁辐射防护标准	49
3.1.1	IEEE C95.122005 标准	50

---

3.1.2 ICNIRP 导则 .....	53
3.2 国内现行的电磁辐射防护标准 .....	56
3.2.1 卫生标准 .....	56
3.2.2 环保标准 .....	56
3.2.3 电磁辐射暴露限值和测量方法 .....	57
3.3 对制订新的国家电磁辐射防护标准的几点建议 .....	60
3.3.1 电磁辐射防护标准制定的目的 .....	60
3.3.2 电磁辐射防护标准制定的原则 .....	61
3.3.3 电磁辐射防护制定限值依据的选择 .....	61
3.3.4 公众局部暴露 SAR 限值的制定 .....	61
<b>第 4 章 电磁辐射检测方法 .....</b>	<b>63</b>
4.1 电磁辐射场的划分 .....	63
4.2 电磁辐射测量场地 .....	64
4.2.1 开阔试验场 .....	65
4.2.2 微波暗室 .....	66
4.2.3 横电磁波传输室和吉赫兹横电磁波传输室 .....	72
4.3 电磁环境测量的布点方法 .....	77
4.3.1 网格布点法 .....	77
4.3.2 人口密度加权和有效辐射功率加权布点法 .....	78
4.3.3 梅花瓣布点法 .....	80
4.4 电磁辐射监测仪器概况 .....	80
4.4.1 近场区测量技术和仪器概况 .....	80
4.4.2 远场区测量技术和仪器概况 .....	82
4.4.3 测量仪器的分类 .....	83
4.5 综合场强仪 .....	85
4.5.1 探头单元 .....	86
4.5.2 主机单元 .....	87
4.5.3 接口单元 .....	87
4.5.4 软件单元 .....	87



---

4.6 频谱分析仪	87
4.6.1 什么是频谱分析仪	88
4.6.2 频谱分析仪的发展	90
4.6.3 频谱分析仪的现状	92
4.6.4 频谱分析仪的分类	94
4.6.5 快速傅氏变换分析仪	95
4.6.6 外差式频谱分析仪	96
4.6.7 频谱分析仪的主要参数	97
4.7 虚拟频谱分析技术简介	99
<b>第5章 电磁波吸收理论与计算方法</b>	<b>101</b>
5.1 电磁学的发展和计算电磁学的主要方法	101
5.1.1 电磁计算方法分类	102
5.1.2 常用的电磁场数值计算方法	104
5.2 电磁波吸收机理	109
5.2.1 电磁波在自由空间的传播	109
5.2.2 电磁波在介质中的传播	114
5.2.3 电磁波的吸收损耗和干涉损耗	118
5.3 电磁波吸收计算方法	120
5.3.1 传输线法	120
5.3.2 电路模拟法	124
5.3.3 优化方法	125
5.4 电磁波吸收计算方法的发展趋势	126
<b>第6章 电磁波吸收材料</b>	<b>128</b>
6.1 电磁波吸收材料的研究背景	128
6.2 电磁波吸收材料的组成	130
6.3 电磁波吸收材料的分类	130
6.4 电磁波吸收材料的研究动态	131
6.4.1 导电高聚物材料	131

---

6.4.2	手性吸波材料 .....	132
6.4.3	多频谱吸波材料 .....	133
6.4.4	电路模拟吸波材料 .....	134
6.4.5	纳米材料 .....	134
6.4.6	超细合金粉 .....	135
6.4.7	纤维吸波材料 .....	137
6.4.8	铁氧体系列吸波材料 .....	140
6.4.9	等离子体吸波材料 .....	142
6.4.10	盐类吸波材料 .....	143
6.5	吸波材料的理论基础 .....	145
6.5.1	吸波材料的电物理性能 .....	145
6.5.2	制备吸波材料的物理化学基础 .....	147
6.5.3	吸波材料的热物理性能 .....	149
6.5.4	吸波材料电磁参数的匹配与最佳化 .....	149
6.6	电磁损耗机制 .....	151
6.6.1	电损耗机制 .....	151
6.6.2	磁损耗机制 .....	152
6.7	吸波材料电磁参数的测试和性能评价 .....	158
6.7.1	电磁参数的测试方法 .....	158
6.7.2	吸波材料反射系数的频率特性测试 .....	160
6.7.3	网络参数法 .....	161
6.7.4	微波矢量网络分析仪介绍及测量系统 .....	167
6.7.5	吸波材料性能的评价指标 .....	171
6.8	电磁波吸收材料的应用 .....	172
6.8.1	吸波材料的应用前景 .....	172
6.8.2	吸波材料的发展趋势 .....	176
<b>第7章</b>	<b>电磁波吸收材料的设计 .....</b>	<b>178</b>
7.1	无反射曲线拟合 .....	178
7.2	吸波涂层设计 .....	181

7.2.1	吸收型吸波涂层 .....	182
7.2.2	干涉型吸波涂层 .....	182
7.2.3	谐振型吸波涂层 .....	183
7.3	结构型吸波材料设计 .....	183
7.3.1	层板吸波结构 .....	183
7.3.2	夹层吸波结构 .....	184
7.3.3	频率选择表面吸波结构 .....	185
7.3.4	电路模拟吸波结构 .....	185
7.3.5	铁氧体栅格结构 .....	186
7.3.6	角锥吸波结构 .....	187
7.3.7	角锥复合吸波结构 .....	189
7.4	单层电磁波吸收体的设计 .....	189
7.5	$\lambda/4$ 型电磁波吸收体的设计 .....	192
7.6	多层电磁波吸收体的设计 .....	195
7.7	吸波材料设计的发展趋势 .....	199
<b>第 8 章</b>	<b>电磁屏蔽的理论和技术 .....</b>	<b>201</b>
8.1	电磁波在介质中的传播及其性质 .....	201
8.2	电磁屏蔽原理 .....	202
8.2.1	电磁屏蔽概念 .....	202
8.2.2	电磁屏蔽的作用原理 .....	203
8.2.3	电磁屏蔽的分类 .....	204
8.3	屏蔽效果的表示 .....	209
8.3.1	衡量屏蔽效果的物理量 .....	209
8.3.2	影响屏蔽效能的关键因素 .....	211
8.4	电磁屏蔽技术与设计 .....	212
8.4.1	一些实用的屏蔽技术 .....	212
8.4.2	机箱电磁屏蔽的设计 .....	214
8.5	电磁屏蔽材料的种类 .....	219
8.5.1	金属多层屏蔽材料 .....	219

---

8.5.2 导电高分子 .....	220
8.5.3 复合型导电高分子 .....	220
8.5.4 导电涂料 .....	221
8.6 电磁屏蔽材料应用 .....	221
8.6.1 电磁屏蔽材料的发展历史和现状 .....	221
8.6.2 电磁屏蔽涂料的研究与开发 .....	227
8.7 电磁屏蔽材料的发展方向 .....	235
8.7.1 现有电磁屏蔽材料存在的问题 .....	235
8.7.2 电磁屏蔽材料的发展趋势 .....	237
<b>第9章 电磁辐射污染防治对策</b> .....	<b>238</b>
9.1 广播、电视发射台的电磁辐射防护 .....	239
9.2 工业、科学和医疗设备电磁辐射的防护 .....	239
9.2.1 高频设备的电磁辐射防护 .....	240
9.2.2 微波设备的电磁辐射防护 .....	241
9.3 建筑室内电磁屏蔽技术 .....	243
9.3.1 建筑室内电磁屏蔽设计目的 .....	244
9.3.2 建筑室内电磁屏蔽基本规划 .....	244
9.3.3 建筑室内电磁屏蔽基本设计 .....	245
9.3.4 建筑室内电磁屏蔽工程实施设计 .....	246
9.3.5 建筑室内电磁屏蔽工程施工与监理 .....	248
9.3.6 建筑室内电磁屏蔽维持与管理 .....	249
9.4 无线局域网干扰防护 .....	250
9.4.1 无线局域网用电磁波吸收体特点 .....	250
9.4.2 目前已经应用的无线局域网电磁波吸收体 .....	251
9.5 电子不停车收费系统电磁干扰防护 .....	252
9.6 日常生活中电磁辐射污染防治 .....	253
9.6.1 计算机的电磁辐射防护 .....	254
9.6.2 微波炉的电磁辐射防护 .....	255
9.6.3 手机的电磁辐射防护 .....	256

---

9.6.4 其他电器电磁辐射防护 .....	257
9.7 常用的电磁辐射防护产品 .....	259
9.7.1 电磁辐射防护服装 .....	259
9.7.2 电磁辐射防护卡 .....	261
9.7.3 电磁辐射防护眼镜 .....	262
9.7.4 电磁辐射防护窗帘 .....	262
9.7.5 电磁辐射防护食品 .....	263
9.8 其他电磁辐射防护及小常识 .....	265
9.8.1 对雷电电磁辐射的防护 .....	265
9.8.2 屏幕电磁辐射对女性容颜的潜在伤害 .....	265
9.8.3 注意键盘清洁卫生 .....	266
9.8.4 搞好绿化能减少电磁污染 .....	266
附录 常用家用电器电磁辐射数据 (仅供参考) .....	267
参考文献 .....	270

# 第1章 电磁理论基础

1820年，丹麦科学家奥斯特发现电流的磁效应，第一次揭示了电与磁之间存在本质联系。1831年，英国科学家法拉第发现了电磁感应（磁铁同导线相对运动时，导线中有电流产生）定律。这为发电机的实现奠定了理论基础。1864年，英国物理学家麦克斯韦在法拉第发现的基础上，提出了电磁理论，并把电磁运动规律概括为两组偏微分方程，大胆预言自然界存在电磁波。1888年，德国物理学家赫兹证明了电磁波的存在，其性质与麦克斯韦方程所预见的完全一致。麦克斯韦的电磁理论揭示了光、电、磁本质的统一性，完成了自然科学的一次理论大综合，标志着经典物理学已经成熟，并为此后开始的以电力应用为中心的技术革命奠定了理论基础。

电磁理论和电力、电子技术的迅速发展，为人类社会的发展倾注了新的活力，同时也对各个科学领域带来了严峻的挑战。随着人工电磁辐射污染源的不断增加，环境电磁污染问题已引起了人们极大的重视，其中主要有：（1）无线电广播、电视发射台、微波通信等各种射频设备产生的辐射，被称为射频（RF）电磁场。（2）大功率电机、变压器、输电线以及家用电器等产生的电磁场，被称为工频（PF）电磁场。早在20世纪60年代，人们就已经开始意识到这两种电磁污染的普遍性和危害性，各国纷纷将电磁辐射污染列为必须控制的环境污染物之一。为了彻底了解电磁辐射对人体的作用机理和危害程度，各国科学家在近半世纪以来作出了坚持不懈的努力，从不同角度进行了广泛的研究。

众所周知，一块琥珀经过摩擦后会吸起草屑，一把梳子经过摩擦后可以吸起纸片，一个磁铁则能把铁钉吸起来……这些现象都是由电力与磁力作用的结果。虽然自古以来，人们就已经知道这些力的存在，然而对于电学与磁学的系统研究，还只是在十

五、六世纪才有所发展、作为电磁学这门科学来讲，在上个世纪末才有了较明确的认识，在众多科学工作者的辛勤工作基础上，始而得到了进一步的发展。几乎从来没有一门科学的成就能比电磁学更具有如此广泛而且深远的影响。为了更好地研究与论述电磁辐射的监测与防护技术，创造一个无污染的工作环境与生活环境，首先，对电磁学方面的几个基本物理概念作一些必要的介绍。

## 1.1 真空中的静电场

### 1.1.1 电荷的基本概念

#### 1.1.1.1 两种电荷

远在公元前 585 年，古希腊的泰勒斯就已记载了用木块摩擦过的琥珀可以吸引尘埃或碎草等轻小物体，人们就说琥珀带了电，或说它带有电荷。

1733 年法国的杜费发现电荷有两种，而且同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。

摩擦过的玻璃棒上所带的电荷称为玻璃电或正电荷，琥珀上产生的电与硬树脂上产生的相同，称为树脂电或负电。

#### 1.1.1.2 点电荷

为了对电荷之间的相互作用进行定量的描述，需要建立点电荷模型。若一个带电体的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多，以至于带电体的大小、形状及电荷的具体分布对问题的影响小到可以忽略不计，就可以把带电体看成一个点电荷，认为带电体上的所有电荷都集中于一个几何点上。

显然，正如质点概念一样，点电荷概念也是实际情况的理想化。

#### 1.1.1.3 电荷的量子化

1906 至 1917 年，美国物理学家密立根（R. A. Millikan）的油滴实验和无数其他的实验表明，在自然界中，电荷总是以一确

定的量为单元出现的。用  $e$  表示这个量，称为基本电荷。若用国际单位制表示，其量值为

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$$

质子、电子及其他一切带电粒子所带的电荷都与这个量完全相等，只不过正负有区别而已。迄今为止还没有人能完全说明为什么它们的电荷相等会达到这么惊人的准确程度，也没有人能解释是什么力把互相排斥的同号电荷结合成一个稳定粒子的，这个谜的破解需要等待未来革命性地实现。

英国物理学家狄拉克 (P. A. M. Dirac) 曾提出过磁单极子假设。认为由此可以解释电荷的量子化，但磁单极子从未在实验中被发现过。

对于宏观的带电体来说，由于所带电量远远大于基本电荷。电荷量子化现象可不予考虑，而认为电源可以具有任意大小。

### 1.1.2 真空中的库仑定律

1785 年，法国物理学家库仑 (Coulomb) 通过扭秤实验总结出两个静止点电荷之间电相互作用的规律，把电学从定性描述提高到定量研究的水平。库仑定律的矢量形式为：

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21} \quad (1-1)$$

式中  $\mathbf{F}_{21}$ —— $q_2$  受到来自  $q_1$  的作用力，N；

$q_1, q_2$ ——两个点电荷的电量，C；

$\mathbf{r}_{21}$ ——由  $q_1$  指向  $q_2$  的矢径， $\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ ，m；

$\epsilon_0$ ——真空介电常数， $\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 。

比例系数写成  $4\pi\epsilon_0$  是为了由库仑定律导出的一系列表达式中部不再含有无理数  $\pi$ 。在国际单位制 (SI) 中，它被定义为等于真空中光速平方的  $10^{-7}$  倍。

所以  $\epsilon_0$  可被精确解出  $\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。



### 1.1.3 电场强度

#### 1.1.3.1 电场

将某电荷  $q_1$  放在“一无所有”的空间中， $q_1$  将不受任何作用。但若将另一电荷  $q_2$  放在  $q_1$  附近，则  $q_1$  将受到一个作用力。显然， $q_2$  的存在改变了空间各点的性质，我们说  $q_2$  在其附近空间产生了电场，而正是这个电场对  $q_1$  产生了作用力。同样  $q_1$  也在周围空间产生了电场，且对  $q_2$  产生作用。

静止电荷在空间中产生的电场称为静电场。我们只讨论静电场的宏观性质，而不追究场的微观结构以及它是如何由电荷产生出来的。

大量的实验证明，作为物质存在的一种形式，场也具有能量、质量及动量，其真实性一点也不比由分子、原子等构成的“实物”来得差。

#### 1.1.3.2 电场强度

实验指出，对于静电场中的任一确定点，放在该点的电荷受的力与该电荷的电量成正比。这表明，可以引进一个表征电场性质的物理量——电场强度矢量  $E$ 。

定义

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1-2)$$

式中  $E$ —— $q_0$  所在处的电场强度，N/C 或 V/m；

$F$ —— $q_0$  所受的电场力；

$q_0$ ——放在场中某点处试验电荷的电量。

为使  $q_0$  的存在不至于影响场源电荷的分布（从而导致场的变化），要求  $q_0$  的电量要足够小；为使  $q_0$  所在处（场点）的坐标得以准确测定，要求  $q_0$  的线度足够小（其理想化的极限就是点电荷）。

由于静电场是由静止电荷所产生，其总场可以从库仑定律出