



# 电磁波屏蔽 及 吸波材料

刘顺华 刘军民 董星龙 等编著



化学工业出版社



# 电磁波屏蔽 及 吸波材料

刘顺华 刘军民 董星龙 等编著



化学工业出版社

·北京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

电磁波屏蔽及吸波材料/刘顺华, 刘军民, 董星龙等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2006. 9

ISBN 978-7-5025-9341-4

I. 电… II. ①刘…②刘…③董… III. ①电磁波-屏蔽②电磁波-吸收-  
材料 IV. 0441. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 117942 号

---

**电磁波屏蔽及吸波材料**

刘顺华 刘军民 董星龙 等编著

责任编辑: 邢 涛 李晓文

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 吴 静

封面设计: 尹琳琳

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 14½ 字数 447 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9341-4

定 价: 38.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 前言

电磁波吸收与屏蔽材料涉及到电磁场与电磁波理论、材料学科的众多分支(金属材料、陶瓷、高分子材料、微纳米材料、薄膜与涂层、复合材料、材料工艺学)以及电磁波与材料相互作用引申出的反射、折射(透射)现象及与之相关的材料结构和组合,是多学科的交流。

屏蔽与吸收材料不仅在军事上有其特殊的战略地位,在民用上也日趋广泛。因此,各国争相投入大量人力和物力进行广泛的研究。应该说电磁屏蔽理论和实践已日趋成熟。但是,电磁波吸收材料方面仍有许多问题尚不清楚。为了促进吸波材料设计和研究的不断深入,本书在分析和总结了吸波体的组成特征后,提出了吸波体由透波材料和吸波剂两种要素构成。透波材料和吸波剂的有效组合决定了吸波体的阻抗匹配。指出吸波体应具有电磁波的导行功能,只有将电磁波引入吸波体内部才能吸收电磁波。因此,在吸波体中不仅有传输线,而且还应有谐振腔和介质波导或是它们的组合。同时提出吸波体的设计不仅应满足阻抗匹配,还必须满足能量守恒。阻抗匹配为电磁波的透入创造了前提,能量守恒则为计算电磁损耗提供了依据。上述观点集中分布在书中第7~9章中。对阻抗匹配的思考在众多的文献中早有阐述,并已成为实践所证明。这里需要指出的是:仅仅有阻抗匹配并不能解决吸收效能问题,吸收效能或电磁损耗需从能量守恒中去探寻。对于实用吸波体来说,二者缺一不可。在前言里指出这些观点是想让读者在阅读本书时进行深入思考,提出问题,引起讨论,并提出批评指正。

全书共计11章。第1章主要介绍了麦克斯韦方程、平面电磁波和导行系统;第2,3章介绍了电磁屏蔽原理和屏蔽体的设计;第4~6章给出了电磁波吸收材料所必备的透波材料和吸波剂(磁介质吸波剂和电介质吸波剂)以及相关的基础知识;第7~9章为本书的重点,分别介绍了吸波体基础知识、设计原理和各类吸波体的设计;第10章为

检测方法；第 11 章介绍了屏蔽材料与吸波材料的应用。

本书由刘顺华、刘军民、董星龙负责编写，刘顺华统筹。参加本书编写工作的还有段玉平、管洪涛、杜纪柱。其中刘顺华编写了第 4 章、第 7~9 章，刘军民编写了第 1 章、第 2 章、第 10 章，董星龙编写了第 5 章、第 6 章，段玉平和管洪涛编写了第 3 章、第 11 章，杜纪柱参与编写了 7.4、7.5 两节。

本书可供从事电磁屏蔽与吸收材料研究、设计和生产企业的工程技术人员参考，也可作为高等院校材料学科的本科生和研究生的参考书。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

刘顺华 于大连理工大学

2006 年 11 月

# 目 录

■ 1 电磁波理论基础	1
1.1 电磁场基本方程	1
1.1.1 麦克斯韦方程组	1
1.1.2 静态电磁场基本方程	5
1.1.3 电磁场边界条件	8
1.1.4 电磁场的能量	10
1.2 平面电磁波基本方程	12
1.2.1 理想介质空间的平面电磁波	12
1.2.2 有耗媒质空间的平面电磁波	15
1.3 媒质的电磁特性	19
1.3.1 电介质的极化	19
1.3.2 磁介质的磁化	22
1.3.3 导电媒质的传导特性	24
1.4 均匀平面波的反射与折射	25
1.4.1 均匀平面电磁波对分界面的垂直入射	25
1.4.2 多层媒质分界面上的垂直入射	31
1.4.3 均匀平面电磁波对分界面的斜入射	34
1.5 导行电磁波	38
1.5.1 平行板波导	39
1.5.2 矩形波导	42
1.5.3 矩形谐振腔	51
1.5.4 圆柱波导及圆柱谐振腔的特性参数	52
参考文献	55
■ 2 电磁波的危害及其屏蔽原理	57
2.1 电磁波的危害	57
2.1.1 电磁波污染的分类	57

2.1.2	电磁波对人体的影响	58
2.1.3	电磁波对环境的影响	60
2.1.4	电磁波对设备的影响	61
2.2	电磁屏蔽原理	62
2.2.1	电磁屏蔽的类型	62
2.2.2	静电屏蔽	62
2.2.3	交变电场的屏蔽	64
2.2.4	磁场的屏蔽	65
2.2.5	电磁屏蔽与屏蔽效能	67
2.3	电磁防护标准	71
2.3.1	电磁辐射容许值标准	71
2.3.2	中国的电磁防护标准	72
2.3.3	美国的电磁防护标准	74
2.3.4	前苏联的电磁防护标准	75
2.3.5	IRPA 的电磁防护标准	75
	参考文献	76

### ■ 3 屏蔽体的设计 77

3.1	理想屏蔽体	77
3.1.1	屏蔽原理	77
3.1.2	接地系统	80
3.1.3	电源线的处理	82
3.2	屏蔽板材的厚度	83
3.2.1	厚度计算	83
3.2.2	屏蔽体的选材	85
3.3	缝隙对屏蔽体的影响	86
3.3.1	孔隙对屏蔽效能的影响及其计算	86
3.3.2	孔隙的处理	90
3.3.3	网材屏蔽效能	92
	参考文献	97

### ■ 4 介电材料与透波材料 99

4.1	概述	99
4.2	介质的极化	100
4.2.1	半径为 $R$ 的球核模型	101
4.2.2	分子的极化	102

4.3	极性分子的极化 .....	104
4.3.1	极化的表征 .....	104
4.3.2	化学键的电偶极矩 .....	106
4.4	介电材料 .....	108
4.4.1	介电材料的分类 .....	108
4.4.2	介电材料的特性参数 .....	108
4.4.3	有耗介电材料 .....	112
4.4.4	无耗或低耗介电材料 .....	118
4.5	透波材料 .....	131
4.5.1	透波原理 .....	131
4.5.2	无机透波材料 .....	135
4.5.3	有机透波材料与有机-无机透波材料 .....	138
	参考文献 .....	144

## ■ 5 磁性材料与电性材料基础 146

5.1	磁性材料基础 .....	146
5.1.1	磁性材料的基本概念 .....	146
5.1.2	稳态磁化与反磁化过程 .....	155
5.1.3	动态磁化过程中的磁损耗 .....	160
5.2	电性材料基础 .....	177
5.2.1	电子类载流子导电机制 .....	178
5.2.2	离子类载流子导电机制 .....	186
5.3	复合材料的电性能 .....	188
5.3.1	概述 .....	188
5.3.2	复合效应 .....	189
5.3.3	复合材料的结构参数 .....	190
5.3.4	复合材料中的逾渗理论 .....	192
	参考文献 .....	203

## ■ 6 电磁波吸收剂 206

6.1	吸收剂的性能表征 .....	207
6.1.1	吸收剂的电磁参数 .....	207
6.1.2	吸收剂的密度 .....	210
6.1.3	吸收剂粒度 .....	210
6.1.4	吸收剂形状 .....	210
6.1.5	工艺性 .....	211



6.1.6	化学稳定性和耐环境性能 .....	211
6.2	电磁波吸收剂的类型 .....	211
6.2.1	电阻型吸收剂 .....	211
6.2.2	电介质型吸波剂 .....	217
6.2.3	磁介质型吸波剂 .....	217
6.2.4	吸波剂的改性 .....	238
6.2.5	新型吸波剂 .....	244
6.3	吸波剂研究展望 .....	251
	参考文献 .....	252

## ■ 7 吸波体基础知识 255

7.1	吸波体的组成特征 .....	255
7.1.1	均匀分布 .....	256
7.1.2	层状分布 .....	257
7.1.3	球形分布 .....	257
7.1.4	沿开放式多孔泡沫分布 .....	258
7.2	吸波体的结构类型 .....	259
7.2.1	涂覆型吸波材料 .....	260
7.2.2	结构型吸波材料 .....	266
7.3	折射系数与介电常数 .....	277
7.4	介质波导 .....	282
7.4.1	概述 .....	282
7.4.2	介质波导 .....	282
7.5	谐振腔 .....	287
7.5.1	开放式谐振腔 .....	287
7.5.2	谐振腔的稳定性 .....	289
7.5.3	谐振腔的特性与参数 ( $f_{\text{eff}}$ , $f$ 及 $Q$ ) .....	291
7.5.4	谐振球 .....	297
	参考文献 .....	300

## ■ 8 吸波体设计原理 303

8.1	能量守恒原理 .....	304
8.2	阻抗匹配原理 .....	305
8.3	透射系数与反射系数 .....	309
	参考文献 .....	312

## ■ 9 吸波体设计 313

9.1 吸波体的设计目标与设计思路	313
9.1.1 设计目标	313
9.1.2 吸波体的设计思想	315
9.2 传输线理论在吸波体中的应用	316
9.2.1 传输线理论	317
9.2.2 传输线理论在单层吸波体中的应用	319
9.2.3 传输线理论在多层吸波体中的应用	331
9.2.4 传输线理论的局限性	336
9.3 具有非均匀分布特征的涂层与平板的设计	337
9.3.1 组织设计	337
9.3.2 结构设计	341
9.3.3 均匀分布涂层与平板的改进	344
9.4 微波暗室用吸波体的设计	345
9.4.1 吸波体的结构类型	345
9.4.2 频宽设计	347
9.4.3 吸收效能设计	350
9.4.4 材料及工艺	351
9.4.5 存在问题	354
9.5 谐振型吸波体的设计	355
9.5.1 综述	355
9.5.2 组织特征	357
9.5.3 理论模型分析	359
9.5.4 吸收性能	361
9.5.5 制造工艺	365
9.5.6 谐振型吸波体的应用和发展前景	367
参考文献	368

## ■ 10 电磁屏蔽与吸波特性测试方法 372

10.1 基本测试条件简介	372
10.1.1 测试场地	372
10.1.2 亥姆霍兹线圈	373
10.1.3 平行板线	374
10.2 主要测试仪器	375
10.2.1 测量接收机	375

10.2.2	网络分析仪 .....	377
10.2.3	驻波测量线 .....	377
10.2.4	微波功率计 .....	379
10.2.5	场强计与天线 .....	380
10.3	基本电磁特性的测试 .....	381
10.3.1	驻波比测量 .....	382
10.3.2	反射系数测量 .....	385
10.3.3	阻抗测量 .....	386
10.4	材料屏蔽与吸波特性的测试 .....	388
10.4.1	驻波测量线法 .....	388
10.4.2	场强计法 .....	389
10.4.3	网络分析仪法 .....	390
	参考文献 .....	392

## ■ 11 电磁屏蔽与吸收材料的应用 ————— 393

11.1	概述 .....	393
11.1.1	微波暗室的屏蔽 .....	394
11.1.2	通讯电缆的屏蔽 .....	412
11.1.3	电磁辐射的防护 .....	414
11.2	隐形材料在军工产品上的应用 .....	418
11.2.1	飞机隐身技术 .....	419
11.2.2	坦克隐身技术 .....	425
11.2.3	舰船隐身技术 .....	427
11.2.4	巡航导弹隐身技术 .....	429
11.2.5	反隐身技术 .....	431
11.3	隐形材料在民用产品上的应用 .....	434
11.3.1	人体防护 .....	434
11.3.2	建筑防护 .....	438
11.3.3	精密仪器 .....	442
11.3.4	日用品 .....	443
	参考文献 .....	452

# 1

## 电磁波理论基础

### 1.1 电磁场基本方程

#### 1.1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组是英国物理学家 J. C. 麦克斯韦 (1831 ~ 1879) 于 1873 年建立的。方程组全面概括了此前电磁学实验和理论研究的全部成果, 用数学的方法深刻揭示了电场与磁场、场与场源以及场与媒质间的相互关系和变化规律, 并且预言了电磁波的存在。因此, 麦克斯韦方程组是经典电磁理论的核心, 是研究一切宏观电磁现象和工程电磁问题的理论基础。

若用  $\mathbf{r}$  表示三维空间位置矢量,  $t$  表示时间变量, 麦克斯韦方程组的微分形式为:

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1-1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1-1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t) \quad (1-1d)$$

式中  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ ——电场强度矢量, V/m;

$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ ——磁场强度矢量, A/m;

$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ ——电位移矢量, C/m<sup>2</sup>;

$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ ——磁感应强度矢量, T;

$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ ——电流密度矢量,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;

$\rho(\mathbf{r}, t)$ ——电荷密度,  $\text{C}/\text{m}^3$ 。

式(1-1a)称作全电流安培定律, 它揭示了磁场与其场源的关系。 $\mathbf{J}$ 是自由电子在导电媒质中运动形成的传导电流或在真空、气体中运动形成的运流电流, 换句话说, 就是真实的带电粒子运动而形成的电流。这些电流可以是外加的电流源, 也可以是电场在导电媒质中引起的感应电流。 $\partial\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)/\partial t$ 称作位移电流, 其本质是时变电场的时间变化率, 具有与传导电流相同的量纲。位移电流没有传统意义上电流的概念, 只是在产生磁效应方面与一般电流等效。然而, 位移电流的引入正是麦克斯韦对电磁理论的重要贡献之一, 它表明时变电场可以产生磁场, 并由此预言了电磁波的存在和时变电磁场的波动性。

式(1-1b)称作电磁感应定律, 是麦克斯韦对法拉第电磁感应定律进行推广而得出的, 它反映了随时间变化的磁场可以产生电场的事实。式(1-1c)称作磁通连续性原理, 由此说明自然界不存在磁荷, 磁力线必然是无头无尾的闭合线。式(1-1d)称作高斯定律, 它表明电荷是产生电场的场源之一。

将散度定理和斯托克斯定理

$$\oint_s \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int_v \nabla \cdot \mathbf{F} d\tau$$

$$\oint_c \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \nabla \times \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$$

应用于式(1-1a)~式(1-1d), 可以得到如下积分形式的麦克斯韦方程组

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (1-2a)$$

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-2b)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-2c)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad (1-2d)$$

仔细观察麦克斯韦方程组可以发现, 各个方程并不是完全独立的, 或者说上述各式是非限定形式。例如对式(1-1b) 两边取散度并根据矢量运算法则可得

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \text{常数}$$

由于  $t=0$  时,  $\mathbf{B}=0$ , 所以上式中的常数应该为零, 从而得到了式(1-1c)。同样, 对式(1-1a) 两边取散度有

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = 0$$

将电学中的电流连续性原理

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

代入上式中, 即可得出式(1-1d)。

以上分析表明, 仅有式(1-1a)~式(1-1d) 是无法完全确定  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{B}$  四个场量的。

为了使麦克斯韦方程组具有限定的形式, 需要引入场量与媒质特性之间的关系, 这些关系称作电磁场本构关系。在各向同性线性媒质中, 本构关系为

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \epsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1-3)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (1-4)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sigma \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1-5)$$

其中,  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_r \mu_0$ 。  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  (F/m),  $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$  H/m 分别为真空介电常数和磁导率。  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  分别为媒质的相对介电常数和相对磁导率, 二者均无量纲。  $\sigma$  为媒质的电导率, S/m。

利用本构关系, 仅含有场量  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  的麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \sigma \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1-6a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1-6b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-6c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{\rho(\mathbf{r}, t)}{\epsilon} \quad (1-6d)$$

以上给出的麦克斯韦方程组对于随时间作任意变化的电磁场都是适用的。但是，在实际应用中，最常遇到的是随时间作正弦变化的电磁场，也称作时谐电磁场。工程应用中的激励源通常就是这种场，并且，根据傅里叶变换理论，任意形式的时变场都可以用时谐场的叠加来表示，因此，分析时谐场的麦克斯韦方程具有重要的意义。

时谐场是指场矢量的每一个坐标分量都随时间做正弦变化的场。以电场强度为例，在直角坐标系中，时谐场可表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = e_x E_{xm}(\mathbf{r}) \cos[\omega t + \phi_x(\mathbf{r})] + e_y E_{ym}(\mathbf{r}) \cos[\omega t + \phi_y(\mathbf{r})] + e_z E_{zm}(\mathbf{r}) \cos[\omega t + \phi_z(\mathbf{r})]$$

式中， $E_{xm}(\mathbf{r})$ 、 $E_{ym}(\mathbf{r})$ 、 $E_{zm}(\mathbf{r})$  分别为三个坐标分量的振幅； $\phi_x(\mathbf{r})$ 、 $\phi_y(\mathbf{r})$ 、 $\phi_z(\mathbf{r})$  分别为三个坐标分量的初始相位，它们都仅是空间位置的函数； $e_x$ 、 $e_y$ 、 $e_z$  分别为三个坐标方向的单位矢量； $\omega$  为角频率。

分析时谐场的有力工具是复数。根据复数的性质，上式可重新表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = & e_x \operatorname{Re}[E_{xm}(\mathbf{r}) e^{j\phi_x(\mathbf{r})} e^{j\omega t}] + e_y \operatorname{Re}[E_{ym}(\mathbf{r}) e^{j\phi_y(\mathbf{r})} e^{j\omega t}] + \\ & e_z \operatorname{Re}[E_{zm}(\mathbf{r}) e^{j\phi_z(\mathbf{r})} e^{j\omega t}] = \operatorname{Re}[\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}] \end{aligned} \quad (1-7)$$

其中

$$\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = e_x E_{xm}(\mathbf{r}) e^{j\phi_x(\mathbf{r})} + e_y E_{ym}(\mathbf{r}) e^{j\phi_y(\mathbf{r})} + e_z E_{zm}(\mathbf{r}) e^{j\phi_z(\mathbf{r})}$$

称作电场强度矢量  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  的复振幅，仅是空间坐标的函数，与时间无关。由式(1-7)可见，求得复振幅  $\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$  后，乘以  $e^{j\omega t}$  再取实部，便可以得到瞬时电场强度矢量  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 。

同理， $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$  和  $\rho$  各物理量均可表示为复振幅与因子  $e^{j\omega t}$  相乘的形式。由于

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{Re}[\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}] = \operatorname{Re}[j\omega \dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) e^{j\omega t}]$$

代入式(1-1a) 运算得

$$\operatorname{Re}\{[\nabla \times \dot{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{r}) - j\omega \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{r})] e^{j\omega t}\} = 0$$

若上式对任意时刻都成立，则必须

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{r}) + j\omega \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{r}) \quad (1-8)$$

将上式与式(1-1a)相比较可以发现，二者具有明显的区别。为了书写方便，省略符号“·”，并且对式(1-1b)~式(1-1d)作同样处理后得到复数形式的麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}(\mathbf{r}) + j\omega \mathbf{D}(\mathbf{r}) \quad (1-9a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega \mathbf{B}(\mathbf{r}) \quad (1-9b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1-9c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r}) \quad (1-9d)$$

复数麦克斯韦方程组中的场量仅是空间坐标的函数，并且方程由偏微分简化为代数方程形式，从而使电磁问题的求解更加容易。

### 1.1.2 静态电磁场基本方程

静态电磁场是指不随时间变化的电磁场。这种场的特点是电场与磁场相互独立，电场由静止电荷产生，磁场由恒定电流产生。

在式(1-1a)~式(1-1d)和式(1-6a)~式(1-6d)中令  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$ ,

$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$ ，并略去时间变量  $t$ ，则得到静态场的基本方程如下

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}(\mathbf{r}) \quad (1-10a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1-10b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1-10c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r}) \quad (1-10d)$$

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-11a)$$

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-11b)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-11c)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_\tau \rho d\tau \quad (1-11d)$$



### 1.1.2.1 静电场的基本性质

式(1-10b)、式(1-10d)表明,静电场是有散无旋场,因此静电场的电力线起始于正电荷而终止于负电荷,如图1-1所示。

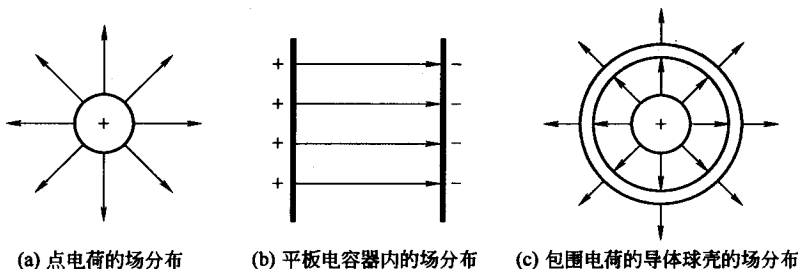


图 1-1 静电场分布实例

根据式(1-11b),静电场是一种保守场,因此,电场强度矢量可以用一标量函数表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla \varphi(\mathbf{r}) \quad (1-12)$$

$$\text{而} \quad \varphi(\mathbf{r}) = \int_r^{r_0} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l} + \varphi(\mathbf{r}_0) \quad (1-13)$$

标量函数  $\varphi(\mathbf{r})$  称作电位函数,其物理意义为静电场力将单位正电荷从  $r$  点沿任意路径移动到  $r_0$  点时所做的功。 $r_0$  点称作电位参考点, $r_0$  不同, $\varphi(\mathbf{r})$  也不同,因此电位是一个参考量。为简单起见,通常令  $\varphi(\mathbf{r}_0) = 0$ , 于是

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int_r^{r_0} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l} \quad (1-14)$$

式(1-11d)称作静电场的高斯定律,其物理本质表示电位移矢量  $\mathbf{D}$  穿过任意闭合曲面  $S$  的通量,式中的  $V$  是  $S$  所围成的体积。值得指出的是,虽然高斯定律描述的是电场的通量,但是,当电场分布具有某种对称性时,利用高斯定律可以简便地求得电场强度  $\mathbf{E}$ 。

**例 1-1** 如图 1-2 所示。半径为  $a$  的球形电子云团的电荷体密度为  $\rho = -\rho_0 r (0 \leq r \leq a)$ ,  $\rho_0$  为常数。电子云团内、外空间的介电常数均为  $\epsilon_0$ , 求空间的电场强度矢量  $\mathbf{E}$  和电位函数  $\phi$ 。