



电介质物理学

(工 科 用)

[法] R. 科埃略 著

科学出版社

201/202/05

电介质物理学

(工 科 用)

[法] R. 科埃略 著

吕景楼 李守义 译

杨顺华 校

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书系统地介绍电介质物理的基本原理和方法。全书共分三章，第一章综述静电学基础，并讨论原子和分子极化的各种模型及其与介电常数的联系；第二章讨论复介电常数，物质在交变电场中的性能和电场与物质的相互作用；第三章介绍物质在高电场下的耗散效应，各种类型载流子以及主要的击穿过程。在阐述理论的同时，还介绍了有关的应用，并汇编和分析了大量习题。

本书可供理工科大学的物理、物理化学、非金属材料、电力工程等专业的高年级学生、研究生以及从事这方面工作的科技人员参考。

R. COELHO

Physics of Dielectrics for the Engineer

Elsevier Scientific Publishing Company, 1979

电 介 质 物 理 学

(工 科 用)

[法] R. 科埃略 著

吕景楼 李守义 译

杨顺华 校

责任编辑 李义发

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年2月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984年2月第一次印刷 印张：6 1/8

印数：4001—6,750 字数：133,000

统一书号：13031·2483

本社书号：3409·13—3

定 价： 0.96 元

译 者 的 话

本书可作为工程基础学科的教科书之一，它系统地介绍电介质物理的基本原理和方法。本书论述深入浅出，概念清楚、叙述简要。除了阐述基础性理论外，还介绍了这个领域的有关发展情况。本书是作者根据在巴黎高等电力学院讲授电介质物理课程时的讲义基础上编写而成的，是他几十年教学实践的总结。作者重视理论与实践的联系，介绍理论在工程上的应用，并汇编和分析了大量习题，以帮助读者深入理解和提高独立分析能力。

本书翻译工作分工如下：第一章和第二章由吕景楼翻译；第三章、参考文献说明及索引由李守义翻译。本书在翻译过程中，798厂李远，清华大学周志刚，中山大学彭少麒，1129所孟秀林等同志审阅了部分译文，提出了许多宝贵意见，全书最后由杨顺华同志进行了认真详细的校订，谨在此对他们表示衷心的感谢。

在翻译过程中，对原书的一些错误，凡已发现的都已作了改正。由于我们水平有限，译文中不妥之处在所难免，请广大读者批评指正。

译者

序 言

十二年来，我一直在巴黎高等电力学院为电机工程系的学生讲授电介质物理课程。由于这一课程成功地为学生们所接受，同时考虑到这门课程缺乏合适的教科书，因此促使我以原讲稿为基础写成本书。

我力求遵从我在麻省理工学院作研究生时从导师 Von Hippel 那里所受到的卓越教导，致力于讲述电介质可能具有的特性，并将其理想性能与实际性能进行比较。

为此，我必须启发学生，使他们自己进入这样的境地，即有时仅作为纯技术问题来处理，而不作科学上的探讨。此外，我还必须帮助他们攻读静电学、波动理论、热力学和统计力学等基础理论，并对这些基础理论加以汇编，从而建立一门在对“分子工程学”（这个名称是由 Von Hippel 提出的）深入理解基础上的实用学科。为帮助读者达到上述目的，书中提供了许多待解的习题，这些习题都曾由我的学生们做过，并根据其教学效果又进行了选择，这些内容构成本书的一个基本部分。

本书虽然主要是为对材料科学感兴趣的研究生和工程师而写的，但对于那些为寻求用简单方法来处理物质电性质的技术人员也将是有用的。我希望专家们也能发现这部书是有价值的文献，因为本书的表达方法虽然比较初等，但它却达到了初等范围内所能达到的高水平。

虽然本书所介绍的大部分内容在其它出版物中已有过充分的论述，但本书独到之处是在于试图系统地把那些高深的

概念阐述清楚,并把它们彼此联系起来,使非专业的读者也能接受这些概念,从而填补了教科书与高级专著之间的空白。

本书第一部分是关于静电学基础的简要综述,并讨论了原子和分子极化的各种模型及其与宏观介电常数的联系。

第二部分通过复介电常数,介绍物质在交变电场中的性能,并讨论电场和物质之间的各种相互作用。

第三部分以宽禁带半导体模型为依据,专门论述强电场下的耗散效应,并从这一模型出发,讨论各种类型的载流子。最后,叙述主要的击穿过程及有关的一些实验方法。

要使这本简明扼要的教材对基础参差不齐的读者都能适用,除非牺牲它的完整性,否则难以达到其目的。许多重要的课题,诸如由非电应力(压电与热释电)感生的各种电极化、自发极化和永久性极化(铁电体、驻极体等)、瞬时的热电激励和压电激励电流,以及类似树枝状和内放电式非本征的击穿机理等,有意被省略或仅作为应用例子引用,但有关这些课题的一般性参考文献已经收集在本书之中。

本书的目的是作为上述诸课题的入门书,如果它能有助于读者了解这些课题,并促使人们作进一步的研究,作者将感到满足。

本书文献目录所列举的仅仅是一些主要专著和评述文章,这里并不需要系统地参考科学期刊中发表的论文,因为读者可以从一般性书目中得到这些资料。

最后,仅向那些为讨论我的初稿而付出许多宝贵时间的人们表示衷心的感谢,其中包括伦敦 Chelsea 大学的 A. Jonscher 教授,他为本书第二部分提供了有关德拜弛豫效应模型的评论性分析。海法 Technion 的 N. Klein 教授参加了第三部分有关击穿模型的讨论。

此外,我还要衷心感谢 Hervo 夫人熟练地为初稿进行了

英文打字，Palierne 夫人为本书绘制了颇有艺术性的插图，以及热情帮助我完成最后校订工作的同事们。尽管有他们极其宝贵的合作以及经作者仔细的校订，但差错仍在所难免、恳请读者予以批评指正。

R. 科埃略

1978年7月

符 号

罗马字母

- a* 距离
- A** 安培
- b* 距离
- B** 磁感应强度, 双折射系数
- c* 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$
- C** 电容
- d* 距离
- D** 电感应强度, 扩散系数
- e* 电荷, 离心率, 光的电矢量
- E** 电场
- f* 摩擦系数, 频率, 反作用电场
因数
- F** 力
- g* 内电场因子, 取向相关参数
- G** 电导
- h* 普朗克常数, Cole-Cole 参数
- H** 磁场
- i* $\sqrt{-1}$, 约化电流密度
- I** 电流, 电流密度
- i, J* 电流密度
- k* 玻尔兹曼常数; 吸收指数
- K** 相对介电常数 ϵ/ϵ_0 , 热导率
- l, L* 长度
- m* 质量, 有效感生偶极矩
- M** 质量

- n* 折射率 ($n^* = n - ik$), 粒子数密度
 - N** 浓度
 - p* 极化强度
 - P** 几率
 - q, Q* 电荷
 - r, R* 距离
 - s* 秒
 - S** 熵, 序参数
 - t* 时间
 - T** 温度
 - u* 单位矢量
 - U** 能量
 - v* 单位矢量, 速度
 - V** 电势
 - u, W* 能量
 - x* $\cos\theta$ (朗芝万记号)
 - X** 约化距离
 - y* $\frac{\mu E}{kT}$ (朗芝万记号)
 - z* $\frac{\Delta\alpha E^2}{2kT}$
- 希腊字母
- α 极化率, 吸收系数, 汤森德倍增因数
 - β $\frac{\Delta\alpha kT}{\mu^2}$, 弹簧常数, 复吸收系

	数的虚部	λ	长度(波长,德拜长度),约化长度 (a/r)
γ	退极化因数,复吸收系数 ($r^* = \alpha + i\beta$)	μ	偶极矩;磁导率;迁移率
Γ	传热系数,伽马函数	ν	浓度
δ	损耗角,约化距离	ω	角频率
ϵ	绝对介电常数 ($\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$)	Ω	立体角
φ	相位角,电势	$\bar{\omega}$	几率
Φ	约化电势,衰变函数,功函数	ρ	电荷密度
Ψ	波函数,永久偶极子和分子轴之间的夹角	σ	电导率
		τ	弛豫时间

目 录

第一章 恒定电场中的物质	1
§1.1 引言——静电学简述	1
§1.2 一组电荷的电势	3
1.2.1 多极展开式	4
1.2.2 单个点电荷的多极展开式	7
1.2.3 实际偶极子的多极展开式	8
§1.3 外场感生的偶极子	10
1.3.1 电子极化率的量子力学描述	10
1.3.2 球状原子和分子的基本模型	12
1.3.3 非球状原子和分子的基本模型	16
1.3.4 离子极化率的谐振子模型	23
§1.4 外电场中偶极子取向的统计理论	26
1.4.1 自由点偶极子的情况(朗之万理论)	26
1.4.2 晶格中点偶极子的情况	32
1.4.3 $\Delta\alpha > 0$ 的可极化偶极子情况	36
§1.5 微观量与宏观量间关系的理论	40
1.5.1 稀释相	40
1.5.2 非极性凝聚相;洛伦兹理论	42
1.5.3 凝聚相;翁沙格理论	44
1.5.4 克尔电光效应	51
第二章 交变电场中的物质	62
§2.1 复介电常数	62
2.1.1 ϵ^* 和 σ^* 的定义;电磁波的传播	62
2.1.2 各种类型的电荷和电荷组及其相互作用	66

2.1.3	线性材料对可变电场的响应	70
2.1.4	交变电场的情况; Kramers-Krönig 关系式	71
§2.2	弛豫	74
2.2.1	引论	74
2.2.2	弛豫的力学模拟	76
2.2.3	高级公式形式; 定义和定理	77
2.2.4	应用于偶极子弛豫——德拜关系	78
2.2.5	$\epsilon''(\epsilon')$ 的表示 (Argand 图)	80
2.2.6	对德拜理论的修正	81
2.2.7	界面弛豫; 麦克斯韦-瓦格纳效应	93
2.2.8	晶格缺陷的偶极子弛豫	99
2.2.9	空间电荷极化和弛豫	102
2.2.10	近期的工作——多体解释	109
§2.3	共振	111
2.3.1	线性振子模型	111
2.3.2	一维极性晶格	114
第三章	高电场下的耗散效应	119
§3.1	绝缘体和宽禁带半导体	119
3.1.1	本征传导和杂质传导	119
3.1.2	注入过程	121
§3.2	空间电荷受限注入-受控传导	127
3.2.1	平行平面组态, 莫脱关系式	128
3.2.2	圆柱形组态	134
3.2.3	球形组态	136
3.2.4	点面形组态	137
§3.3	电场感应的本征传导	139
3.3.1	Poole-Frenkel 效应	140
3.3.2	电场感应的离解	141
3.3.3	载流子的产生和复合传导的普遍公式	142
§3.4	电介质强度	147

3.4.1	热击穿	148
3.4.2	本征击穿过程	156
3.4.3	脉冲持续时间效应	165
3.4.4	实验步骤	166
参考文献		172
索 引		180

第一章 恒定电场中的物质

§ 1.1 引言——静电学简述

本书的目的是为多少熟悉经典物理学的读者了解绝缘材料在强电场下的性能所涉及的物理概念提供一个坚实的基础。

根据定义,绝缘体是这样一种材料,即在电场作用下,没有稳定的传导电流通过。因此,绝缘体能够积聚电荷,储存静电能,正是由于这个原因,它是一种电介质。不过,电能也可以用其它机制储存。例如,表 1.1 列出静电能和电化学能的储存与释放的比较。

表 1.1

	静电	电化学
最大的储存能量密度 ($\text{kw} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	≤ 0.1	$> 10^4$
最大电流 (Amp)	$\sim 10^6$ (仅受外部电路限制)	$\sim 10^3$
最大电压 (V)	$10^5 n$	$1.5n$

n 为串联的元件数。

“电介质”一词,特别是把它用作形容词时,概括了范围很广的材料。对于可以赋予一个介电常数(如用下述光学方法测量)的任何物质,如我们在下文中将看到的,都可以看作是电介质,至少在高频下是这样,因此,电介质包括所有材料,从电解质以至金属。

这就是本书的范围不局限于绝缘体的原因，同时我们也希望所有涉及材料科学的读者(大学生、工程师、物理学家、化学家等)都将发现，本书是值得一读的。

表 1.2 总结了为很好理解本书内容所需具备的静电学基础知识。

由于超小型化电路的出现，电容器日益变成一种价格昂贵和体积庞大的电子元件，这种情况使得对电介质的研究重新活跃起来，直接或者间接地针对着改善材料储存与释放静电能的能力。

因此，本书将详尽论述的表 1.2 中的基本关系式是静电能密度方程(9)及其积分形式(9'):

$$w = \frac{1}{2} \epsilon E^2,$$

这个方程仅包含两个量： ϵ 和 E 。第一个因子 ϵ 为材料的绝对介电常数，它与真空绝对介电常数 ϵ_0 间的关系为 $\epsilon = K\epsilon_0$ ，这里无量纲因子 K 称为材料的相对介电常数。 E 为所考虑的某一点的局部电场强度。正如我们将看到的，由于种种原因，这个电场和外加电场大不相同。

因此，方程(9')的两个因子，一个是与材料微观性质有关的介电常数 ϵ ，另一个是材料所能承受的最高电场强度(或称介电强度)，这些将在下面分别进行讨论。

因为第一个量常常涉及稳定的直流特性，但通常却又是用交变电场来测量，所以必须首先讨论它的稳定值，即静态介电常数，然后再研究它在外加交变电场下的特性，即复介电常数。

这样，本书内容就自然地划分为如下三章：第一章：恒定电场中的物质；第二章：交变电场中的物质；第三章：高电场下的耗散效应。

表 1.2

物理量	符号	定 义	序号	单位 (S.I.)
电场强度	\mathbf{E}	$\mathbf{E} = -\nabla V$	(1)	Vm^{-1}
传导电流密度	\mathbf{j}_c	$\mathbf{j}_c = \sigma \mathbf{E}$	(2)	$\text{QT}^{-1}\text{m}^{-2} = \text{Am}^{-2}$
偶极矩	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\mu} = q\mathbf{r}$	(3)	Qm
极化强度	\mathbf{P}	$\mathbf{P} = \frac{\partial \boldsymbol{\mu}}{\partial v}$	(4)	Qm^{-2}
		(单位体积中的偶极矩)		
电感应强度	\mathbf{D}	$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	(5)	Qm^{-2}
感应电流密度	\mathbf{j}_D	$\mathbf{j}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	(6)	Am^{-2}
总电流密度	\mathbf{I}	$\mathbf{I} = \mathbf{j}_D + \mathbf{j}_c$	(7)	Am^{-2}
		$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$	(8)	
介电常数	ϵ	$\mathbf{P} = (\epsilon - \epsilon_0) \mathbf{E}$	(8')	$\text{QV}^{-1}\text{m}^{-1}$
静电能密度	w	$dw = \mathbf{D} \cdot d\mathbf{E}$	(9)	QVm^{-3}
		各向同性物质		
		$w = \frac{1}{2} \epsilon E^2$	(9')	
高斯定律 (推论)		$\int_V \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho dv$	(10)	Q
泊松定律		$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	(11)	Qm^{-3}
拉普拉斯-麦克斯韦方程式 (略去 H 项)		$\nabla \cdot \mathbf{I} = 0$	(12)	Am^{-3}
		用(7)和(11)		
电荷守恒方程式		$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_c = 0$	(13)	Am^{-3}

§ 1.2 一组电荷的电势

从历史上来讲, 给出两个彼此距离为 $r(\text{cm})$ 的相同点电荷 Q 之间排斥力(达因)大小的关系式 $F = Q^2/r^2$ 纯粹是一个经验公式, 它规定了电荷的 c.g.s. 静电单位.

这个著名的平方反比定律经过数学论证已经建立在牢固的基础上(高斯定理)。一个点电荷在距离 r 处产生的电势随 $\frac{1}{r}$ 变化。

在目前使用的国际单位制中,电荷的单位是库仑,它表示在一秒钟内一安培电流所传输的电荷。库仑(本质上是属于电磁性的)与 c.g.s. 静电单位间的关系中含有光速 c (参考 2.1.1)。 $c = 3 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 一库仑等于 3×10^9 c.g.s. 静电单位。

与一个电荷 Q (库仑)相距 r 处的电势(伏特)可表示为如下熟悉的形式:

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (1.1)$$

式中 ϵ_0 为真空的介电常数,等于 $10^{-9}/36\pi(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

物质的组成部分(原子、分子、晶体等)是各种类型电荷的集合,它们是按照原子核和电子的经典模型定义的各种点电荷,或是根据量子力学定义的各种分布电荷。

物质电学性质的一切表现,即物质显示其存在的所有标志,表明了电势是由组成物质的各种电荷所产生的,因此了解如何计算电势具有根本的重要性。

下面提出两个没有详细证明的命题,并通过求解一些简单例子来加以说明,希望它们会有助于理解一些更抽象的概念。

1.2.1 多极展开式

命题 1:

任何电荷组(如分子中的电荷),在离该电荷组足够远的某点 M 看来,可以看作是点多极子的叠加,即: 一个点单极子

Q_0 (是一个标量); 一个点偶极子 Q_1 (是一个矢量); 一个点四极子 Q_2 (是一个二阶张量); ……; 一个点(2^n)极子 Q_n (是一个 2^n 阶张量)。

虽然在上列的各项中指明了多极子的张量性质, 但对下文的了解并不需要熟悉张量。我们可以把由电荷组产生在点 M 处的电势 $V(M)$ 简单地视为如下展开式:

$$V(M) = \sum_{i=0}^{i=\infty} V_i$$

$$= V_0 + V_1 + V_2 + \cdots + V_n + \cdots,$$

式中, V_0 为点单极子的电势, 它随 r^{-1} 变化; V_1 为点偶极子的电势, 它随 r^{-2} 变化; V_2 为点四极子的电势, 它随 r^{-3} 变化; 等等。

命题 2:

$V(M)$ 的多极展开式取决于原点的选定。

命题 1 和命题 2 可用下例来说明:

让我们考虑分别位于点 A 和点 B 的一对电荷, 它们的数值分别为(+4)和(+1), 两点之间距离为 $2d$, 设有一点 M , 它在远离点 A 和点 B 处。

为了计算在 M 点处的电势 $V(M)$, 必须选定一个原点。原点的位置可以是任意的, 但最简便的是选在 A 和 B 之间的中点 O 。

另一个简便的选定方法是取诸电荷的质心 Q 作为原点。

(a) 若选定 O 为原点时, 则有图 1.1 示出的关系。

处在 O 点处的电荷(+5)便是体系电荷的总和, 它是一个单极子, 其数值显然不依赖于原点。

数值相等而符号相反的两个电荷 (± 1.5) 构成一个实际的偶极子, 下面将证明, 以原点为中心的这个实际偶极子可以看作是具有相同偶极矩 ($3d$) 的点偶极子, 为此必须增添从