

高等学校函授教材

(兼作高等教育自学用书)

电 磁 场 学 习 指 导 书

陆忠亮 主编

高等教育出版社

高等学校函授教材
(兼作高等教育自学用书)

电 磁 场 学 习 指 导 书

陆忠尧 主编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 5 字数 120,000

1983年11月第1版 1984年5月第1次印刷

印数 00,001—13,400

书号 15010·0534 定价 0.59 元

前 言

本书系俞大光编《电工基础》(修订本)下册1981年版的函授自学指导书。目的是向选用该书为教材的函授学员和自学读者介绍电磁场原理的学习方法、学习要求,帮助他们正确理解教材中的概念、定义、定理和定律等。本书对教材中的难点、重点和一些基本概念作了补充说明,还配有一定数量的自我检查题,以期检查、巩固读者的学习效果。

本书力图贯彻1981年审订的高等工业学校《电工原理函授教学大纲》(草案)的要求及“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的精神,对大纲中打*号的或教材中以小字印刷的内容一般不作进一步说明。

每章指导包括如下几个部分:(1)内容重点和前后联系;(2)学习顺序指导;(3)学习方法指导;(4)自我检查题;(5)阶段测验题等。

本书中出现的章节编号是原教材中的编号。为避免混淆,图号分三种:(1)说明部分和例题的编号,如图16-1、图17-2等,其中的16、17为原教材各章的编号;(2)自我检查题的图号,如图检查题16-1、图检查题17-2等;(3)阶段测验题的图号,如图测验题16-1、图测验题17-2等。

参加本书编写工作的有陆忠亮、肖衍明、周佩白和钱秀英四同志。由陆忠亮主编。

本书承阜新矿院函授部认真审阅,提出了宝贵的意见,特致衷心的感谢。

限于我们的水平和经验,书中不妥之处在所难免,衷心欢迎批评指正。

目 录

一、 绪论	1
二、 一、 学习方法指导	2
三、 各章学习方法指导	4
引言	4
第十六章 静电场	4
第十七章 导电媒质中的恒定电场	62
第十八章 恒定磁场	75
第十九章 时变电磁场	116
附录1 电磁场的物质性	152
附录2 电磁场的统一性	154

一、绪 言

1. 本课程的目的和任务

本课程是电类专业的一门技术基础课。在物理电磁学的基础上,通过本课程的学习,使读者进一步熟悉宏观电磁场的基本性质和基本规律,对电工技术中一些共同性的电磁现象和电磁过程,能应用场的观点进行初步分析,对一些较简单的问题能进行计算,为学习专业或进一步研究电磁问题,准备必要的理论基础。

2. 本课程与高等数学和物理学的关系

(1) 与高等数学的关系。各章要用到的数学工具,如场论、矢量分析、数理方程与特殊函数、复变函数等应在高等数学中学习。

(2) 与物理学的关系。通过物理学中电磁学部分的学习,对电磁运动的一般规律应有所了解,并能进行初步计算。本课程在此基础上进行。

3. 本课程的学时分配

本课程的函授自学学时大致为 151 学时。其中包括阅读和做习题的时间,但做自我检查题和阶段测验题的时间不在其内。各章学时分配如下:

第十六章 静电场	64 学时
第十七章 导电媒质中的恒定电场	11 学时
第十八章 恒定磁场	42 学时
第十九章 时变电磁场	34 学时

读者可参照上述学时分配,根据自己的情况适当拟定自学计划。

二、一般学习方法指导

电磁场原理是一门理论性较强的课程。相对于电路和磁路来说比较抽象。“路”中研究的模型是电阻、电感、电容、电源，它们都有对应的实物。“路”中的物理量也易于测量。电磁场则不然，加之电磁场所用的数学工具和数学推导较多，有的读者因此感到抽象。希望读者在学习过程中，不要被数学推导所迷惑。数学仅仅是一种工具，应透过数学推导，着眼于物理概念的理解和掌握。要加强抽象思维和推理能力的培养。对各类电磁场要注意其空间分布特点和随时间的变化规律。

在每章学习开始的时候，先看本指导书的“内容重点和前后联系”及“学习顺序指导”这两部分。应尽量按指定顺序学习。

1. 教材的阅读

(1) 教材的阅读应仔细。阅读教材的初步要求：“懂”。必须在对前面的基本内容获得正确了解后，再继续前进。

(2) 阅读教材的同时应做笔记。记下物理量和其他计算量的定义、定律和定理的表述、计算公式、典型示例的解答以及存在的问题等。在一些需要特别记忆的公式、结论之下打上重点记号。

(3) 阅读教材的进一步要求：“记”。在弄懂基本内容之后，最好在纸上重复教材中的推导和演算。以求记住要领，掌握各重要物理量和公式的意义、导出的前提、导出的过程。一定要熟悉各类电磁场的重要性质与规律——积分形式和微分形式的电磁场的基本方程组。要注意各电磁规律的适用范围。

(4) 读完每章之后要小结。搞清楚本章的主要内容有哪些，各主要内容之间有什么联系，本章内容与其他已学过的章节之间有什么联系。特别应注意各类电磁场之间的对比，注意各种场的

计算公式在形式上的相似性以及物理概念上的本质区别。这样,既可加深对本章内容的理解,又可起到复习、巩固已学章节的作用,以逐步达到“熟”的要求。

2. 习题的演算

(1) 注意审题。要搞清楚题意,哪些量已知,哪些量待求。然后,根据场的具体特点选取适当的坐标系。

(2) 做题时要从教材所述及的原理出发,每一步都应有理论根据。这样可通过演题,进一步熟悉教材的内容和培养自己分析问题和解决问题的能力。

(3) 每个习题和自我检查题都应做在练习本上。语言力求简明扼要。每题均应做出所要求的最终答案。各物理量的单位和所有的矢量符号均应注明。

(4) 学习较好的学员,要力求一题多解,要分析各种解法的优缺点,以达到“巧”的要求。

3. 阶段测验

(1) 在做完指导书中所规定的该章习题之后,再做阶段测验题。

(2) 测验题的解答应详尽而有条理。

(3) 阶段测验后要检查这一章中哪些内容已经掌握,哪些内容还存在问题,及时发现薄弱环节,并应采取相应的补救措施。

总之,我们的学习要求是:懂、记、熟、巧。

三、各章学习方法指导

引 言

通过引言的学习, 要求读者从理性上认识学习电磁场的重要性。如果有时间, 请阅读附录 1、2, 以建立对电磁场物质性、统一性的初步认识。

第十六章 静 电 场

内容重点和前后联系

1. 本章主要介绍静电场的基本性质、基本规律和求解方法。本章的研究方法对以后各章有指导意义。根据类比原理, 静电场问题的解可以应用于以后各章, 所以本章的学习十分重要。

2. 学习本章的基本要求是: (1)理解并掌握静电场的基本性质和基本方程; (2)能写出一些简单的静电场问题的微分方程和边界条件——边值问题; (3)能用叠加原理和高斯推广定理计算点电荷系统和一些形状特殊的连续分布电荷系统的电场强度和电位; (4)掌握镜象法、电轴法的实质和计算步骤; (5)学会计算电场能量和电场力的几种方法。

3. 唯一性定理是静电场各种间接解法的理论根据。其概念十分重要, 必须理解、掌握, 但定理的证明不作要求。应学会一些简单形状的两导体系统电容的计算方法。对多导体系统中电位系

数、感应系数和部分电容的意义和计算方法应有所了解。分离变量法、复位函数法、保角变换法、图解法、网格法都是求解边值问题的有效工具,但由于教学时数有限,各地可视情况选学其中的一部分。三相输电线电容的计算除电力类运行专业的读者外,其它专业读者可不学。

学习顺序指导

1. 先读 § 1, 再读学习方法指导 1、2、3、4。回答自我检查题(一)。做习题 1-1。做总习题 16.1。

2. 先读 § 2, 再读学习方法指导 5、6、7、8。回答自我检查题(二)。做习题 2-1、2-2。做总习题 16.2、16.3、16.4、16.5。

3. 先读 § 3, 再读学习方法指导 9。回答自我检查题(三)。做习题 3-1、3-2、3-3。再读学习方法指导 10。回答自我检查题(四)。做总习题 16.6、16.7、16.8、16.9。

4. 先读 § 4, 再读学习方法指导 11。做自我检查题(五)。

5. 先读 § 5, 再读学习方法指导 12。做自我检查题(六)。做习题 5-1、5-2、5-3。

6. 先读 § 7, 再读学习方法指导 13、14。做自我检查题(七)。做习题 7-1。再读学习方法指导 15。做自我检查题(八)。做总习题 16.10。

7. 先读 § 6, 再读学习方法指导 16。回答自我检查题(九)。做习题 6-1。

8. 先读 § 9, 再读学习方法指导 17。回答自我检查题(十)。做习题 9-1、9-2。做总习题 16.11、16.12。

9. 先读 § 8, 再读学习方法指导 18。

10. 读 § 10。做总习题 16. 13。
11. 读 § 11。做总习题 16. 14、16. 15。
12. 先读 § 12, 再读学习方法指导 19。做自我检查题(十一)。做总习题 16. 16。
13. 先读 § 13, 再读学习方法指导 20。做自我检查题(十二)。做习题 13-1、13-2。做总习题 16. 17、16. 18、16. 19。
14. 先读 § 14, 再读学习方法指导 21。做自我检查题(十三)。做习题 14-1、14-2。做总习题 16. 20、16. 21。
15. 先读 § 15, 再读学习方法指导 22。
16. 先读 § 16, 再读学习方法指导 23。做自我检查题(十四)。做习题 16-1、16-2。做总习题 16. 22、16. 23。
17. 先读 § 17, 再读学习方法指导 24。回答自我检查题(十五)。做习题 17-1。做总习题 16. 24。
18. 读学习方法指导 25、26。作本章小结。
19. 完成阶段测验题。

学习方法指导

1. 在学习静电场时, 首先要弄清楚什么叫电场? 什么叫静电场?

什么叫电场? 电场是电磁场的一个方面, 它的表现是对静止电荷有力作用。也就是说, 空间某点有没有电场, 可根据放在这点的静止电荷受不受力来判断。如果静止电荷在这点上受力, 我们就说这点的上有电场, 否则就是没有电场。注意: 为了检验电场的存在, 试验电荷必须是静止的。

什么叫静电场? 静电场是静止电荷周围的电场。这里所谓的“静止电荷”包括两层意思: (1) 从空间上来说, 这个电荷相对观察

者是静止不动的；(2)从时间上来说，这个电荷的电量是不随时间变化的。所以静电场是电量不随时间变化的、静止不动的电荷周围的电场。静电场只能存在于绝缘介质中。

2. 电场强度是表征电场特性的基本场量。必须记住它的定义。注意：(1) 电场强度定义中提到的试验电荷必须是静止的。(2) 电场强度定义中， $\Delta q \rightarrow 0$ 不是数学上的趋于零，而是就物理意义说的。因为电荷是量子化的，至少为 1.6×10^{-19} 库，所以 $\Delta q \rightarrow 0$ ，只表示试验电荷的电量很小，使它对被检验电场分布的影响可以忽略。(3) 电场强度是矢量，在数值上虽等于单位试验电荷所受的电场力，但电场强度不是力。它的单位为伏/米。(4) 电场强度的定义，不仅适用于静电场，而且也适用于时变电磁场。欲求其场强或电位的点，叫场点。场源所在的点，叫源点。

3. 库仑定律是静电场的基本实验定律。要注意它的适用条件。它是在无限大的均匀、线性、各向同性介质(即媒质)中总结得出的实验定律。

如果介质不均匀，就应考虑极化电荷的作用。对非线性介质来说， ϵ 不再是常量。在各向异性介质中，两点电荷之间作用力的方向未必在它们连线的方位上。所以对不均匀的、或非线性的或各向异性的介质，库仑定律不适用。

什么叫线性介质？线性介质乃指介电系数大小与电场强度无关的介质。

什么叫均匀介质？如果在某范围内，介质的介电系数处处一样，我们就说这个范围内介质是均匀的。

什么叫各向同性？如果一种介质，各方向的物理性能一样，那末，我们就说它是各向同性的，否则叫各向异性。在各向同性介质中， D 和 E 同向， $D = \epsilon E$ 。

以下讨论中，凡涉及介质时，除特别说明之外，均指线性的、各

向同性的介质。

4. 学习 §1 时, 一定要掌握点电荷系统和连续分布电荷的电场强度的计算方法。点电荷系统和连续分布电荷的电场强度都可按叠加原理来计算。

在无限大均匀介质中, n 个点电荷在 P 点所激发的场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{r_k^2} \mathbf{r}_k^0 \quad (1)$$

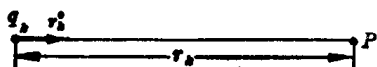
其中 r_k 为由场源 q_k 到场点 P (观测点) 的距离, $\mathbf{r}_k^0$ 为场源 q_k 指向场点的单位矢量。

当电荷作体分布、面分布、线分布时, 其电场强度的计算式分别为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho dV}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \frac{\sigma dS}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_L \frac{\tau dl}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (4)$$



• q_k

$\mathbf{r}_k^0$

图 16-1

上述积分是矢量积分。具体计算时, 应先把各元电荷 (ρdV 或 σdS 或 τdl) 的元场强 dE 按坐标轴分成三个分量, 如 dE_x, dE_y, dE_z , 然后分别积分求得 E_x, E_y, E_z , 再合成为 $E = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$ 。

例1 求无限大均匀介质中, 一均匀带电细圆环轴线上任意点的场强。环的半径为 r , 所带的电量为 q 。

解: 先分析场的分布特点, 以便选取适当的坐标系。由于圆环在几何上有轴对称性, 故均匀带电时, 其激发的电场必对称于轴线, 为轴对称场。计算轴对称场时, 一般选取圆柱坐标系。置圆环于 $yo z$ 平面内, 环的中心在 origin, 环的轴线与 x 轴重合。 r, θ, α 的意义如图 16-2 所示。欲求其轴线上离中心为 x 处 A 点的场强, 可

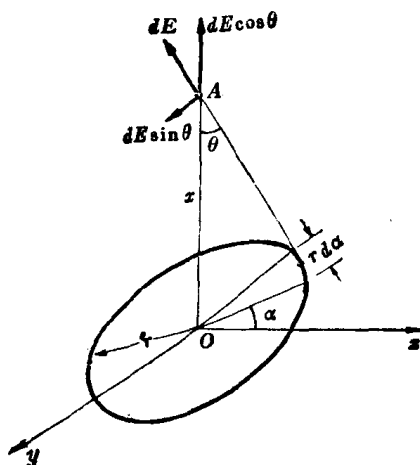


图 16-2

分如下几步: (1)把圆环分成无穷多个微元段; (2)求微元段 $r d\alpha$ 上的微元电荷 (当作点电荷处理) $dq = \tau r d\alpha$ 在 A 点激发的元场强

$$dE = \frac{\tau r d\alpha}{4\pi\epsilon(r^2 + x^2)} \left(\text{其中 } \tau = \frac{q}{2\pi r} \right); (3) \text{求所有微元电荷在 A 点激发的元场强的矢量和。由于轴对称的缘故, 各 } dE \text{ 的与环轴垂直的分量 } dE \sin \theta \text{ 互相抵消。故}$$

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{2\pi} dE \cos \theta = \int_0^{2\pi} \frac{\tau r}{4\pi\epsilon(r^2 + x^2)} \cos \theta d\alpha = \frac{q \cos \theta}{4\pi\epsilon(r^2 + x^2)} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qx}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

而

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qx}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \mathbf{i}$$

这结果与原教材 19 页上的结果一致。

例 2 求均匀介质中电荷面密度为 σ 、半径为 R 、均匀带电圆盘轴线上的电场强度。

解: 与例 1 相似, 由于圆盘均匀带电, 且在几何形状上具有轴

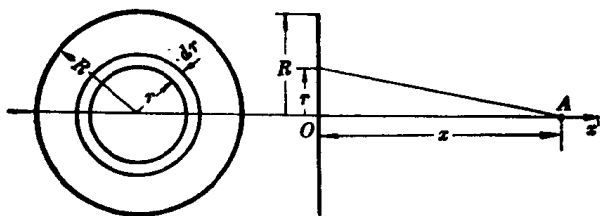


图 16-3

对称性, 故其电场分布必对称于轴线。坐标选取方法、解题步骤与例 1 相同。(1)把圆盘分成无穷多个半径为 r 、宽为 dr 的微元圆环;(2)求微元环上的微元电荷 $dq = 2\pi r\sigma dr$ 在轴线上 A 点所激发的元场强 $dE = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{dqx}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \mathbf{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{2\pi\sigma x r dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \mathbf{i}$;(3)求所有微元电荷在 A 点激发的电场强度的矢量和。由于各微元电荷在 A 点激发的场强方向一致, 故

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_0^R \frac{2\pi\sigma x r dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\sigma x}{2\epsilon} \left[-(r^2 + x^2)^{-\frac{1}{2}} \right]_0^R \\ &= \frac{\sigma x}{2\epsilon} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right] = \frac{\sigma}{2\epsilon} \left[1 - \frac{x}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right] \end{aligned}$$

因此

$$E = \frac{\pm\sigma}{2\epsilon} \left[1 - \frac{|x|}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right] \mathbf{i} \quad \begin{cases} x > 0 (\text{正 } x \text{ 轴上}) \text{ 时, 取 } + \text{ 号} \\ x < 0 (\text{负 } x \text{ 轴上}) \text{ 时, 取 } - \text{ 号} \end{cases}$$

如圆盘的半径趋向无限大, 即成一无限大带电平面。这时的电场强度, 可将 $R \rightarrow \infty$ 代入上式而得: $E = \pm \frac{\sigma}{2\epsilon} \mathbf{i}$ 。此时, E 的量值与场点和带电平面间的距离无关。

如有两带异号电荷 (电荷面密度的大小相等、符号相反) 的无限大平板, 平行放置, 则其间任意点的电场强度是每一极板上电荷所产生的电场强度的矢量和, 即

$$E = |E_1 + E_2| = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

方向垂直于平板, 两板间为均匀场, 两板外侧无电场。

需要指出: 上面的场强计算方法, 只适用于无限大均匀、线性、各向同性介质中场强的计算。一般在计算场强时可能会遇到数学上的困难, 所以, 我们只要求大家能计算一些形状简单、具有确定电荷分布的带电体的场强。

自我检查题(一)

- (1) 什么叫电场强度? 它是力吗? 它的单位是什么?
- (2) 库仑定律的适用范围如何?
- (3) 点电荷系统和连续分布电荷系统的电场强度如何计算?

5. 高斯推广定理是表征静电场特性的一个基本方程。理解和掌握这个定理是学习本章的基本要求之一。§2 首先回顾了高斯定理特殊形式。当自由电荷为点电荷分布时, 高斯定理的数学表达式为

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\sum q}{\epsilon} \quad (5)$$

如果闭合面内的自由电荷是连续分布的, 则高斯定理为

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\int_V \rho dq}{\epsilon} \quad (6)$$

这两式之所以被称为高斯定理的特殊形式, 是因为它们只适用于无限大均匀介质中的电场。

6. 电介质极化。这部分内容请复习物理学中的有关章节。在证明高斯推广定理的过程中要用到如下概念:

- (1) 电极化强度 $\mathbf{P}$ 为每单位体积内的电偶极矩, 即

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \mathbf{p}}{\Delta V} \quad (7)$$

其中 ΔV 为体积元, $\mathbf{p}$ 为一个分子的偶极子电矩。 $\Sigma \mathbf{p}$ 为 ΔV 内各分子的偶极子电矩之和。

(2) 极化过程中, 穿出任一闭合面 S 的正束缚电荷为

$$Q' = \oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} \quad (8)$$

(3) 根据电荷守恒定律, 留在闭合面内的束缚电荷的电量为

$$q' = -Q' = -\oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} \quad (9)$$

(4) 在各向同性的线性电介质中, 极化强度 $\mathbf{P}$ 与电场强度 $\mathbf{E}$ 成正比, 即

$$\mathbf{P} = \alpha \mathbf{E} \quad (10)$$

式中的 α 称为电介质的极化率, $\mathbf{E}$ 为介质内合场强。

7. 高斯推广定理。下面研究不均匀介质中, 由任一闭合面穿出的 $\mathbf{E}$ 通量与面内电荷间的关系。由此进一步推出高斯推广定理。

电介质对电场的影响, 可以用极化后出现的束缚电荷的作用来表示。因此, 电介质存在时的电场, 可看成是自由电荷与束缚电荷一起在真空中所产生的电场。这样, 由任意闭合面发出的 $\mathbf{E}$ 通量应等于该闭合面内自由电荷 q 和束缚电荷 q' 之和 $(q + q')$ 被 ϵ_0 除后所得之商, 即

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q + q'}{\epsilon_0} \quad (11)$$

将(9)式代入(11)式, 得

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q - \oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S}}{\epsilon_0}$$

或

$$\oint_S (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \cdot d\mathbf{S} = q$$

令

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}^* \quad (12)$$

并称 $\mathbf{D}$ 为电位移或电感应强度,于是有

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (13)$$

如果闭合面内有 n 个点电荷,则相应的关系式为

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \sum_{k=1}^n q_k \quad (14)$$

如果闭合面内的电荷是连续分布的,则

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V dq \quad (15)$$

上列三式即为高斯推广定理。它表明:在静电场中,由任意闭合面穿出的 $\mathbf{D}$ 通量,等于该闭合面内自由电荷的代数和。它不仅适用于均匀介质,而且也适用于任意不均匀介质。

8. 关于高斯推广定理,还希望读者注意以下几点:

(1) 与高斯定理特殊形式不同,高斯推广定理对静电场是普遍适用的。不论介质均匀还是不均匀,各向同性还是各向异性,线性还是非线性,一概适用。它是表征静电场特性的基本方程之一,它说明静电场是有源场(或者叫有散场)。

(2) 高斯推广定理揭示了场量 $\mathbf{D}$ 和场源电荷之间的关系,可把它看作是库仑定理的逆定理。由库仑定律可求已知电荷分布的电场,而根据高斯推广定理可由已知的电场求某区域中的自由电荷的代数和。

* $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ 是 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{P}$ 三者之间的一般关系。不管介质是各向同性还是各向异性,线性还是非线性, $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{P}$ 之间都存在这个关系。在线性、各向同性的介质中,因为 $\mathbf{P} = \alpha \mathbf{E}$,所以这个关系可简化为 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \alpha \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E}$ 。 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 同向, ϵ 为标量。在各向异性介质中, $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 未必同向, ϵ 也不再是标量了。有时把 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 和 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ 这两个关系式叫做介质的性能方程或结构方程。