



全国高等农业院校教材

电 磁 学

生 物 应 用 概 论

● 李广新 主编

● 生物类专业用

中国农业出版社

全国高等农业院校教材

电磁学生物应用概论

李广新 主编

生物类专业用

中国农业出版社

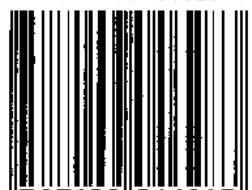
0441-33
7.9

全国高等农业院校教材
电磁学生物应用概论
李广新 主编

责任编辑 段丽君
出版 中国农业出版社
(北京市朝阳区农展馆北路2号)
发行 新华书店北京发行所
印刷 北京市通县曙光印刷厂

开本 850mm×1168mm 32开本
印张 1.5 字数 110千字
版、印次 1997年10月第1版
1997年10月北京第1次印刷
印数 1 2,000册 定价 5.70元

ISBN 7-109-04628-1



9 787109 046283 >

书号 ISBN 7-109-04628-1/TM

前 言

根据农业部“八五”规划教材,按照全国高等农业院校教材指导委员会对教学参考书的要求,即对基本教材中的重点、难点有较深广的阐述,或介绍最新科技成就和发展现状等,以及鼓励编写不同风格和特色的教学参考书的精神,作者根据农科院校生物类专业物理教学的特点,考虑了多年来我国农科院校物理教学研讨会的情况,学生和专业课教师的反映,以及1996年国家教委“面向21世纪农科院校物理的教学改革”课题的要求精神,确定了本书编写的指导思想是:为电磁学(包括“场”和“路”)在生物领域的应用“接口”到位打基础,在此前提下,处理其它问题。

生命物质中的规律问题,虽然包含了大量的物理学问题,但它比传统意义上的物理学的研究对象更复杂,要求更深广的数理知识,而我们面对的是非物理专业,基础和后续课程都对实现上述要求不利。这是一个突出的矛盾。所以,农科物理学的内容安排,是人们长期以来争论的重要问题之一。本书作为尝试,参加研讨,不足之处,请读者不吝指教。

需要说明的几个问题是:第一,农业应用问题。生物学是种植和养殖业的基础,种养业则是生物学的应用,故本书侧重与生物学的结合。第二,数学基础问题。本科学生已具备微积分、矩阵和矢量的初步知识。在此基础上,从物理学应用的角度简要介绍一些张量知识,建立多维空间的概念,学生还是可以接受的。张量这个工具为物理学与生物的结合,创造了极为有利的条件。第三,本书采用国际单位制。引用的个别数据为保持原样没有换算。书中物理量名称、符号、单位等依据的国家标准是GB3100~3102-93。第四,

受篇幅所限,有关过程只有压缩,也无条件再写习题。

北京农业大学金仲辉教授审阅了全稿,提出许多宝贵意见。本书在编写出版过程中,得到农业部教育司、农科院校教材指导委员和安徽农业大学各级领导的大力支持,以及李崇慈教授和薛家骅教授的帮助。书中插图 of 合肥市人才交流中心李小平所画。在此一并表示感谢。对书中所引资料的作者也表示感谢。

编 者

1996年12月

目 录

前 言

第一章 静电场及其生物效应	1
第一节 静电场	1
一、库仑定律	1
二、电场强度和电位	2
三、电介质的极化及其规律	5
四、有电介质的高斯定理和电位移的散度	11
五、静电能和化学键	16
第二节 气体、液体和固体的介电常数	18
一、作用分子的有效电场和克—莫方程	18
二、气体电介质	19
三、液体电介质	21
四、固体有机电介质	21
第三节 生命物质和生物体的静电特性	22
一、生物物质组成	22
二、化学键及其属性	23
三、生物物质的电现象	23
第四节 静电场的生物效应	25
一、天然和人为电场	25
二、获得静电场的方法	26
三、静电生物效应的一般规律	27
第二章 直流	28
第一节 直流及其生物效应	28
一、欧姆定律和非线性元件	28
二、非静电力和电动势	30
三、燃料电池和微生物电池	30
四、生物传感器	32

第二节 直流电路及其解法	35
一、基本概念	35
二、基尔霍夫定律	39
三、网络方程系统化解法	39
四、电路网络的张量解法	44
第三章 交流和交变生物电信号	47
第一节 正弦交流电	47
一、正弦电量三要素	47
二、正弦交流电路元件特性	48
三、正弦电量的符号法	48
四、符号法的应用	51
第二节 整流	55
一、倍压整流	55
二、三相桥式整流	56
第三节 介质损耗和复介电常数	57
一、交变电场中的介质损耗	57
二、复介电常数和复电容	61
三、均匀和非均匀介质的极化和损耗	62
第四节 生物电阻抗	66
一、生物组织电阻抗的特性	66
二、生物阻抗的电学模拟和测量方法	67
第五节 生物反馈	71
一、生物反馈系统的组成	71
二、脑电生物反馈	73
三、生物反馈应用举例	74
第四章 稳恒磁场和生物磁效应	76
第一节 安培定律 磁感应强度	76
一、安培定律	76
二、磁感应强度	77
三、毕奥—萨伐尔定律及其应用	78
四、安培力和载流线圈的磁矩	80
五、磁通量及其变化	81
第二节 磁介质的磁化	82

一、磁化理论两种观点	83
二、原子磁矩和分子磁矩	89
三、物质的抗磁性	92
四、物质的顺磁性	94
五、铁磁质的磁性	95
第三节 磁路定理及应用	98
一、磁路和电路的类比	99
二、磁路的计算	99
第四节 生物的磁效应及应用	102
一、生物物质的顺磁性和抗磁性	102
二、生物体的磁性和环境	104
三、生物磁效应	106
四、生物磁效应农业应用举例	107
第五章 电磁场与生物的作用	109
第一节 电磁波	109
一、麦克斯韦方程组和边界条件	109
二、电磁波及其性质	111
第二节 生物组织的电磁特性	113
一、生物组织的复电导率及复介电常数	114
二、生物组织的磁特性和复数磁导率	118
第三节 电磁场对生物的作用	120
一、生物体内的电磁场概述	120
二、生物的电磁吸收	124
第四节 电磁场的生物效应	132
一、影响电磁生物效应的主要因素	132
二、电磁场生物效应举例	133
主要参考文献	135

第一章 静电场及其生物效应

电荷是实物的一种属性。自然界存在两种电荷，例如电子带负电荷，质子带正电荷。它们所带电量的绝对值为 $e \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。电量是不连续的、量子化的。一切宏观和微观过程都遵守电荷守恒定律。

相对参照系静止的电荷称为静电荷。在其周围空间产生的电场称为静电场。本章介绍静电场和静电场中的生物效应。

第一节 静电场

一、库仑定律

由大量实验总结出来的库仑定律指出，在真空中两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 间的相互作用力的大小，与 q_1 、 q_2 的乘积成正比，与它们间的距离 r 的平方成反比；作用力的方向沿 q_1 、 q_2 的连线，同号电荷时为斥力，异号时为引力。在 SI 中其矢量式可写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (1-1)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数， $\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；

e_r ——矢径 r 方向上的单位矢量。取 q_1 、 q_2 连线为坐标轴，一点电荷为原点。

库仑定律是静电学的基础。库仑力（或称静电力）在原子结构、分子结构和生物化学反应等微观领域中起着重要作用。库仑定律的局限性表现在：在极小距离（ $< 10^{-13} \text{cm}$ ）和极大距离（地

理和天文距离)的情况下是不适用的。根据电磁场量子理论证明和实验,库仑定律在 10^{-13}cm 到若干公里的范围内还是可靠的,这为我们在分子生物学中应用库仑定律提供了依据。

如果式(1-1)中点电荷处在均匀无限大的电介质(即绝缘体)中,则

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (1-2)$$

式中 ϵ ——电介质的介电常数,其单位与 ϵ_0 相同。 ϵ 与 ϵ_0 的关系是

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (1-3)$$

ϵ_r 称为电介质的相对介电常数,是一个无量纲的物理量。 ϵ_r 是电介质重要的电磁性能参数之一,在静电场中,它由电介质的具体结构决定。有人称式(1-2)为广义库仑定律。

二、电场强度和电位

任何电荷都在其周围空间激发电场。电场是物质存在的形式之一。电荷间的相互作用是通过电场进行的。电场的基本性质是对处于其中的任何电荷都有作用力(电场力)。这是我们测量和认识电场的根据。

(一) **电场强度** 为了描述电场的强弱和方向性,引入电场强度的概念,定义式为

$$E = F/q_0 \quad (1-4)$$

式中 F ——试探点电荷 q_0 受的库仑力。

电场中某点的电场强度 E 的大小和方向为单位正电荷在该点受的电场力。电场强度的单位是 V/m 。 E 为矢量点函数 $E(x, y, z)$,空间每一点对应一个 E 矢量,这些矢量的整体称矢量场。所以,电场是矢量场。

点电荷系电场中某点的总电场强度，等于各点电荷单独存在时，在该点产生的电场强度的矢量和，即

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

这就是电场强度的叠加原理。

(二) 电位和电位梯度 设电场力 F 把电荷 q 从电场中的 A 点移动到 B 点， F 对电荷 q 做的功 W_{AB} 是 F 与 dl 的点积，即

$$W_{AB} = \int_A^B F \cdot dl = \int_A^B qE \cdot dl$$

式中 dl 为 q 的位移，比值 W_{AB}/q 只与 A 、 B 位置有关，而与 q 的大小无关，客观地反映单位电荷在电场中 A 、 B 两点间的电位能差值，故定义其为 A 、 B 两点间的电位差，即

$$U_{AB} = W_{AB}/q = \int_A^B E \cdot dl \quad (1-5a)$$

选无穷远处（实际工作中常取地面或仪器外壳）为零电位参考点，则电场中 A 点的电位 V_A 是

$$V_A = \int_A^{\infty} E \cdot dl \quad (1-5b)$$

电位差（电压）和电位的单位都是伏特（V）。电位 V 是空间坐标的标量点函数 $V(x, y, z)$ 。空间坐标的标量函数叫标量场。电位是标量场。标量场沿空间不同方向的变化率用梯度描述。在两个靠近的等位面间沿法向取垂直距离 Δn ，它指向电位增加的方向。电位沿此方向的微商为 $\frac{\partial V}{\partial n} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta n}$ 。大小等于 $\frac{\partial V}{\partial n}$ 、方向指向 Δn 方向的矢量定义为电位的梯度，用 $\text{grad } V$ 或 ∇V 表示，即

$$\text{grad } V = \nabla V = (\partial V / \partial n) e_n$$

式中 e_n 为 Δn 方向的单位矢量。电位沿其它方向的微商 $\partial V / \partial l$ 是

梯度矢量 ∇V 在该方向上的投影。因 E 与 Δn 方向相反，故

$$E = -\nabla V = -\text{grad } V \quad (1-6a)$$

式中 ∇ 称为矢量微分算子，读作那勃勒算子或算符，在 x, y, z 直角坐标系中的表示式为

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

所以

$$E = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} i + \frac{\partial V}{\partial y} j + \frac{\partial V}{\partial z} k \right) \quad (1-6b)$$

式(1-5b)和式(1-6b)分别是 E 和电位间的积分关系和微分关系。通过它们，可由一个求得另一个。在静电场中，如果式(1-5)的积分是经一闭合回路又回到起点，则因 $U_{AB} = 0$ ，故

$$\oint_l E \cdot dl = 0 \quad (1-7a)$$

该式称为 E 的环流定理。它表明静电场是保守场，这是静电场的基本性质。

例 1-1 一对等量异号点电荷 $\pm q$ ，它们间的距离为 L 。这种带电系统叫电偶极子。 q 与 L (方向由 $-q$ 指向 $+q$) 的乘积 $P_e = qL$ 称电偶极矩。试求：(1) 两电荷延长线上一场点 A 的电场强度。(2) 距电偶极子相当远处点 B 的电位。(3) 电偶极子在均匀电场中受的力偶矩。

解：(1) 如图(a)所示， A 点到 $\pm q$ 的距离分别为 $r \mp L/2$ ， $\pm q$ 在 A 点产生的合电场强度的大小为

$$E = E_+ - E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(r-L/2)^2} - \frac{1}{(r+L/2)^2} \right]$$

E 的方向向右。当 $r \gg L$ 时，

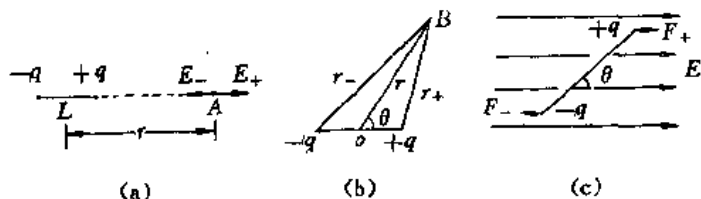


图 1-1 电偶极子的电位和受的力偶矩

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qL}{r^3} = \frac{2p_e}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

(2) 如图 (b), $\pm q$ 单独存在时在 B 点产生的电位分别为

$$V_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_+} \text{ 和 } V_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(-q)}{r_-}$$

根据电位叠加原理, $V_B = V_+ + V_-$ 。因 $r \gg L$, 则 $r_+ \approx r - (L/2)\cos\theta$, $r_- \approx r + (L/2)\cos\theta$, 代入 V_B 表达式并整理得

$$V_B \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e \cdot e_r}{r^3}$$

(3) 如图 (c), E 为均匀电场的电场强度, 电偶极子受的力偶矩

$$T = L \times qE = p_e \times E \quad (1-7b)$$

T 的方向和大小由矢量积决定。电偶极子的概念, 在电介质极化中常用到。电偶极矩 p_e 是描述电偶极子属性的一个物理量。

三、电介质的极化及其规律

一般而言, 静电场中有实物存在, 如为导体, 电场会改变导体上自由电荷的分布产生感应电荷 q_e , q_e 又会反过来改变静电场的原来分布, 两者相互影响和制约, 直至达到平衡态; 如为电介质, 则会产生极化电荷 q' , q' 也会反作用于原来的静电场 E_0 , 现

在讨论后者。它对静电生物效应更具现实意义。

(一) 电介质极化的微观机制 静电场中的电介质内出现正、负束缚电荷的现象,叫做电介质的极化,这种束缚电荷叫极化电荷。电极化是原子中束缚电荷(电子或原子核)在电场力作用下,作微小移动产生的宏观效果。

分子极化及其极化率 电介质分子极化是由电子极化、原子(或离子)极化和偶极子取向极化引起的。

(1) 电子极化。在外电场作用下,原子核外电子云相对原子核发生位移的极化,称为电子极化。其自然振动频率在光频范围,故又称之为光极化。建立和消除电子极化的时间约 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ s。

设带正电($+ze$)的原子核周围均匀分布球形电子云,原子半径为 r ,在外电场 E_i 作用下, $\pm ze$ 电荷的等效中心发生位移。可以证明,因电子极化感应产生的电偶极矩

$$P_{ee} = 4\pi\epsilon_0 r^3 E_i = \alpha_e E_i$$
$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (1-8a)$$

式中 α_e ——电子极化率 (Cm^2V^{-1} 或 C^2mN^{-1})。

α_e 与电子在原子(或离子)中的分布有关,因电子分布与温度无关,故 α_e 也与温度无关。如果根据量子理论,计算结果会更符合实测结果。

(2) 原子极化。在外电场作用下,原子(或离子或原子基团)发生相对位移形成的极化称为原子极化。感应电偶极矩 $p_{ea} = \alpha_a E_i$ 。原子极化建立和消除的时间约为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s。原子极化最典型的例子是离子晶体的极化。例如 NaCl 晶体,由计算可得其原子极化率:

$$\alpha_a = 4\pi\epsilon_0 \frac{a^3}{0.58(n-1)} \quad (1-8b)$$

式中 n ——一般在 7~11 之间;

a —— $E_i=0$ 时正、负离子处于平衡态时的相互距离。

一些共价键结合的极性分子（即无外电场作用时仍具固有电偶极矩的分子），如 HCl、NH₃、H₂O 等，在外电场作用下，其固有电偶极矩因键长增加而发生变化，且与温度无关。一般非离子型介质的 α_e 很小，多与 α_i 合并考虑。

(3) 电偶极子转向极化。即电偶极子的固有电偶极矩 p_{e0} 在外电场 E_i 作用下，转向外电场方向引起的极化，感应电偶极矩正比于 E_i ，由计算得转向极化率为

$$\alpha_t = p_{e0}^2 / 3kT \quad (1-8c)$$

式中 k ——玻耳兹曼常数， $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K；

T ——热力学温度 (K)。

转向（或称取向）极化建立和消除的时间较长，大于 10^{-10} s。

分子的极化感应电偶极矩 $p_e = p_{e0} + p_{e0} + p_{e0}$ ，由

$$P_e = aE_i \quad (1-8d)$$

可知，分子极化率为

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_t \quad (1-8e)$$

非极性分子的 $\alpha_i = 0$ 。 $\alpha_e + \alpha_t$ 又称位移极化率。弹性阻力和热运动都影响电介质的极化。外电场作用下受阻于内部界面和不同物质界面上的电作用引起界面电荷积累，都是引起电介质内界而极化的原因。界面极化影响低频段的介电性质，产生电磁场的能耗。

(二) 电介质的分类 电介质可以按不同方法分类，按电性质，有各向同性和各向异性两类；按电介质分子的极性，有极性（由极性分子组成）和非极性（由非极性分子组成）电介质。无外电场时，分子的正、负电荷“重心”相重合的分子，称为非极性分子；否则，称为极性分子。可见，非极性分子的固有电偶极矩 $p_{e0} = 0$ ，极性分子的 $p_{e0} \neq 0$ 。 p_{e0} 的大小是由极性分子的化学结构

决定的。分子结构对称，为非极性分子；否则，为极性分子。原子的性质和原子在分子中的排列，都影响分子的极性。碳氢化合物都是非极性或弱极性物质。

(三) 电介质的极化规律 为了描述电介质被电场极化的程度，引入电极化强度概念。

1. 电极化强度 在电介质的外电场 E_0 作用下，电介质被极化。电极化强度定义为单位体积内分子电偶极矩的矢量和，即

$$P = \sum p_n / \Delta V \quad (1-9)$$

P 可以定量描述极化状态（大小和方向），其单位是 $C \cdot m^{-2}$ 。设电介质内束缚电荷的体密度为 ρ' ，束缚电荷面密度为 σ' ($\sigma' = q'/S$)， ρ' 和 σ' 与 P 的关系是

$$\oint_S P \cdot dS = - \sum q' \quad (1-10a)$$

$$\sigma' = P \cdot e_n = P_n \quad (1-10b)$$

式中 e_n ——电介质表面上 P 点外法线方向的单位矢量。

因为 ρ' 、 σ' 和 P 是同一电介质被极化的不同宏观表现，三者之间有这种内在联系也是必然的。

2. 电介质的内电场和退极化电场 q' 在电介质内产生附加电场 E' ，电介质内的合电场 E 为

$$E = E_0 - E' \quad (1-11)$$

决定电介质极化的是 E 而不是 E_0 ， $E < E_0$ 是因为 E_0 被 E' 削弱。 E' 总是削弱极化作用，故称之为退极化电场。一般来说， E' 是空间坐标的矢量点函数 $E'(x, y, z)$ ，其大小与电介质的几何形状有关，例如平行板电容器的电介质内

$$E' = \sigma' / \epsilon_0 = P / \epsilon_0 \quad (1-12a)$$

式中 P ——电极化强度。

一般而言， E' 可用下述通式表示：

$$E' = \beta P / \epsilon_0 \quad (1-12b)$$

式中的 $\beta \leq 1$ ，是与介质形状有关的一个因数， β 称为退极化场强因数。 E_0 方向上的介质表面相距愈远， β 值愈小。当 E_0 沿长度方向时，极长棒的 $\beta \approx 0$ ；极短棒的 $\beta \approx 1$ 。

3. 电介质的极化规律 P 和 E 的规律关系，对于不同的电介质是不同的，需由实验测定。

(1) 各向同性电介质。如一些气体和液体，其 P 与 $\epsilon_0 E$ 的方向相同、大小成正比，写为等式

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (1-13)$$

式中 χ_e ——电极化率。均匀各向同性电介质的 χ_e 是一个无量纲的与空间方向无关的标量常量，其大小由电介质的结构决定。 χ_e 与 ϵ_r 的关系是

$$\epsilon_r = \chi_e + 1 \quad (1-14a)$$

$$P = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E = \epsilon_r \epsilon_0 E - \epsilon_0 E = \epsilon E - \epsilon_0 E \quad (1-14b)$$

为便于描述电介质存在时的电场性质，引入电位移 D 的概念

$$D = \epsilon E = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad (1-15a)$$

故
$$D = P + \epsilon_0 E \quad (1-15b)$$

(2) 各向异性电介质。许多电介质是各向异性的，如水晶、蛋白质晶体、层状介质和纤维等。组成生命物质的有机化合物，由于其结构的高度有序性，也多是各向异性电介质。它们电极化规律的特点是： P 与 E 的大小虽成正比（实际是非线性关系的近似处理），但方向一般来说并不相同。此时的 χ_e 或 ϵ_r 不再是标量常量，而是与空间方向有关的具有九个分量的二阶张量。在 x 、 y 、 z 直角坐标系中， P 和 E 的分量间的关系可用下列线性方程组表示：