

大学物理手册

第三分册

电磁学和相对论基础

〔苏〕 B. 亚沃尔斯基 A. 杰特拉夫 著 上海翻译出版公司

大学物理手册

(第三分册)

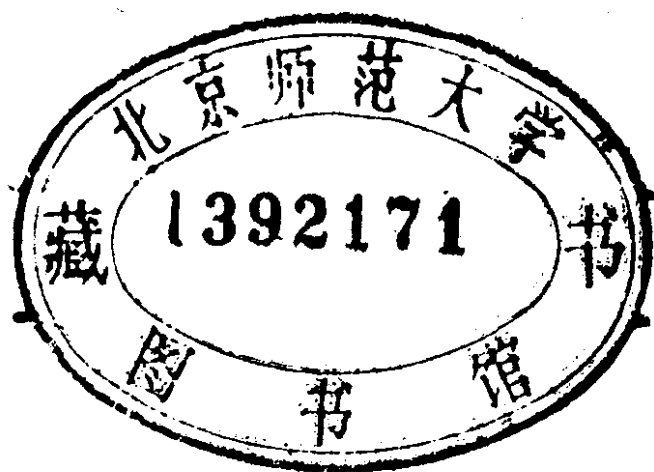
电磁学和相对论基础

[苏联] B. 亚沃尔斯基 A. 杰特拉夫 著

雷仕湛 译

汪沛霖 校

001/188/03



上海翻译出版公司

B. YAVORSKY A. DETLAF
HANDBOOK OF PHYSICS
MIR PUBLISHERS·MOSCOW
1977

大学物理手册

第三分册

〔苏联〕B. 亚沃尔斯基 A. 杰特拉夫 著

雷仕湛 译

汪沛霖 校

上海翻译出版公司出版

(上海武定西路1251弄20号)

新华书店上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 7.625 字数 171,000

1986年9月第1版 1986年9月第1次印刷

印数 1—5,000册

统一书号: 13311·11 定价: 1.60元

791/185/03

出 版 说 明

《大学物理手册》是根据苏联国立列宁师范学院理论物理学教授、物理数学博士 B. 亚沃尔斯基和 A. 杰特拉夫编著的《物理学手册》全文译出的。中译本共分五个分册：

第一分册 经典力学和流体力学

第二分册 热力学和分子物理学

第三分册 电磁学和相对论基础

第四分册 声学、光学和电磁波

第五分册 原子和原子核物理学

这本手册的俄文本自 1972 年出版以来颇受欢迎，短短几年中重版了三次，还出了英译本。它之所以受欢迎，是因为它以大学物理教学参考为主要目的，内容包罗万象。普通物理学中所有的物理现象、定律公式、基本概念等它都有介绍，还包括理论物理学的基础内容，有些内容甚至延伸到专业基础课之中。例如，本册中关于磁流体动力学基础的介绍中，有一般电磁学书上很少见的磁粘滞度、磁雷诺数、磁声波、阿尔芬波、磁激波的介绍，而在磁激波的介绍中又细分为垂直激波、斜激波、平行激波等。凡是一般的物理教科书上查不到的名词，在这本手册中几乎都可以查到。这样，作为一本手册它确实很完满地起到了备查的作用，对于进行普通物理学教学的广大师生来说，无疑是有较大参考价值的。

本分册由雷仕湛翻译，汪沛霖校阅。书中的插图由江秀媛重新绘制。

目 录

第一章 静电学	1
§ 1-1 基本概念 库仑定律	1
§ 1-2 电场 电场强度	3
§ 1-3 电位移 奥斯特洛格拉德斯基-高斯电通量定理	9
§ 1-4 静电场的势	12
§ 1-5 在静电场中的导体	20
§ 1-6 电容	23
§ 1-7 电场中的电介质	27
§ 1-8 铁电体 压电效应	38
§ 1-9 带电导体的能量和电场	40
第二章 金属中的直流电流	44
§ 2-1 基本概念和定义	44
§ 2-2 传导的电子理论	45
§ 2-3 直流电流定律	50
§ 2-4 克希霍夫定律	53
第三章 液体和气体中的电流	57
§ 3-1 液体中的电传导 电解离解	57
§ 3-2 电解定律	58
§ 3-3 电的原子性	59
§ 3-4 液体中的电流欧姆定律	60
§ 3-5 气体中的电导	61
§ 3-6 气体中的非自持放电	62
§ 3-7 气体中的自持放电	63
§ 3-8 等离子体物理基础	68

第四章 半导体中的电流	74
§ 4-1 半导体中的本征传导.....	74
§ 4-2 半导体中的非本征传导.....	75
§ 4-3 金属和半导体的霍尔效应.....	77
第五章 结、热电效应和发射效应	80
§ 5-1 金属的结效应 伏打定律.....	80
§ 5-2 半导体的结效应.....	83
A. 金属-半导体结	83
B. 半导体-半导体结	90
§ 5-3 金属和半导体的热电效应.....	91
§ 5-4 金属中的发射效应.....	97
第六章 直流电流的磁场	101
§ 6-1 磁场 安培定律	101
§ 6-2 毕奥-萨伐特-拉普拉斯定律	103
§ 6-3 由电流建立的最简单磁场	107
§ 6-4 磁场对载有电流导体的作用 导体的相互作用	115
§ 6-5 总电流定律 磁路	118
§ 6-6 在磁场中移动通电导体所作的功	121
第七章 带电粒子在电场和磁场中的运动	123
§ 7-1 洛伦兹力	123
§ 7-2 粒子的荷-质比 质谱.....	126
§ 7-3 带电粒子加速器	127
§ 7-4 电子光学基础	131
第八章 电磁感应	138
§ 8-1 电磁感应的基本定律	138
§ 8-2 涡流	141
§ 8-3 自感应	141
§ 8-4 互感 变压器	146
§ 8-5 由电流建立的磁场能量	149

第九章 物质的磁特性	152
§ 9-1 电子和原子的磁矩	152
§ 9-2 磁性材料的分类	156
§ 9-3 反磁性	157
§ 9-4 顺磁性	159
§ 9-5 磁性材料中的磁场	162
§ 9-6 铁磁性	164
§ 9-7 超导性	169
第十章 电磁振荡	174
§ 10-1 振荡电路	174
§ 10-2 持续电磁振荡	177
§ 10-3 电子管、半导体检波器和放大器	182
第十一章 稳态介质的电动力学基础	190
§ 11-1 麦克斯韦理论的一般特点	190
§ 11-2 麦克斯韦第一方程	191
§ 11-3 位移电流 麦克斯韦第二方程	192
§ 11-4 完整麦克斯韦电磁场方程组	194
§ 11-5 用推迟势法解麦克斯韦方程组(K_0 和 K_m 等于常数)	197
§ 11-6 电磁场守恒定律	200
§ 11-7 电子理论基础 洛伦兹方程组	202
§ 11-8 平均微观场方程组	204
第十二章 磁流体动力学基础	207
§ 12-1 磁流体动力学方程组	207
§ 12-2 磁流体动力学波	212
§ 12-3 突变和激波	214
第十三章 狭义相对论基础	219
§ 13-1 爱因斯坦相对论原理	219
§ 13-2 间隔	221

§ 13-3	洛伦兹变换和它们的结果.....	223
§ 13-4	速度变换.....	225
§ 13-5	四维速度和加速度.....	227
§ 13-6	相对论动力学.....	227
§ 13-7	电磁场的洛伦兹变换.....	231
§ 13-8	瓦维洛夫-切伦柯夫辐射	234
§ 13-9	光学多普勒效应.....	235

第一章 静 电 学

§ 1-1 基本概念 库仑定律

1-1-1 静电学是研究关于所选择的惯性参考系是静止的电荷的特性和相互作用。

有两类电荷：正电荷和负电荷。相同种类的电荷相互排斥，不同种类的电荷相互吸引。

1-1-2 电荷守恒定律指出，在闭合系统中电荷的代数和保持常数。

任何一个物体的电荷是由整数基本电荷所组成，每个基本电荷等于 4.8×10^{-10} 静电单位电荷量 (cgse)。最小的、带负的基本电荷的稳定的亚原子粒子称为电子。电子的质量是 9.1×10^{-28} 克。最小的、带正电荷的稳定的亚原子粒子称为质子。质子的质量是 1.67×10^{-24} 克。在任何物质的原子中包含有电子和质子。

中性物体(不带电的物体)包含符号相反、绝对值相等的两种电荷。

如果聚集电荷的物体线度，比所讨论的问题中任何其他长度都小得多，那么这个带电体称为点电荷。

1-1-3 库仑 (Coulomb) 定律指出，在真空中两个点电荷 q_1 和 q_2 之间的静电相互作用力 F 正比于这两个电荷的乘积，而反比于它们之间的距离 r 的平方，即

用国际单位制(SI)：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

用绝对静电制(cgses):

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

式中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 库仑²/牛顿·米² = 8.85×10^{-12} 法拉/米 是自由空间的电容率或者真空的电容率, 有时也称真空的介电常数.

对于同类电荷($q_1 > 0$ 与 $q_2 > 0$; 或 $q_1 < 0$ 与 $q_2 < 0$), $F > 0$, 这相应于相互排斥. 对于不同类的电荷($q_1 > 0$ 与 $q_2 < 0$, 或 $q_1 < 0$ 与 $q_2 > 0$), $F < 0$, 它对应于电荷的相互吸引力.

1-1-4 静电相互作用力是中心力. 在真空中由点电荷 q_1 作用于点电荷 q_2 的力 F_{12} 等于

用国际单位制:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} r_{12},$$

用绝对静电制:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^3} r_{12},$$

式中 r_{12} 是连接电荷 q_1 和 q_2 的矢径(见图 1-1).

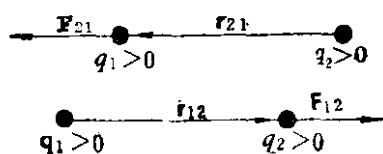


图 1-1

1-1-5 如果点电荷 q_1 和 q_2 是在均匀无限大的电介质中, 则它们的静电相互作用力是

用国际单位制:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{K r^3} r_{12},$$

用绝对静电制:

$$F = \frac{q_1 q_2}{K r^3} r_{12},$$

式中 K_0 是介质的介电常数或它的相对电容率, 它表示电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力, 在真空中比在给定的介质中大多多少倍. 力 F_{12} 减低到真空中的数值的 $\frac{1}{K_0}$, 这与所谓电致伸缩现象有关, 即在电场的影响下, 电介质出现形变的现象. 对于气体和液体的电介质, 因为它们与带电体直接接触, 发生形变时对这些带电体施加额外的机械作用力. 在固体的电介质中, 带电体是放在空腔内的, 因而在其他条件相等的情况下, 作用在这些带电体上的力与空腔的形状有关.

§ 1-2 电场 电场强度

1-2-1 根据短程力作用理论, 彼此相隔某一距离的质点之间和宏观物体之间的相互作用, 是通过由这些质点或物体在周围空间所建立的物理场实现的. 场并不比它们的源——质点和物体小. 物理场的概念与任何相互作用的变化在空间中传播的速度的有限性有紧密的联系. 在狭义相对论中(参见 13-1-2), 它得到了实验的验证, 得出此相互作用的传播速度不超过光在真空中的速度 $c=3 \times 10^{10}$ 厘米/秒.

1-2-2 固定不动的带电粒子或者带电体之间的相互作用是通过静电场来实现的. 静电场是一种稳态电场, 即由固定不动的电荷所建立的. 不随时间变化的电场. 它是带电粒子之间借以实现相互作用的电磁场的特殊情况. 在一般情况下, 这些粒子以任意方式相对参考系运动.

1-2-3 电场强度矢量(静电场强度, 或简称电强度)是电场的力的特征:

$$E = \frac{F}{q_0},$$

式中 $\boldsymbol{F}$ 是场施加于处在场中观察点处静止试验电荷 q_0 的作用力。人们假定，此试验点电荷 q_0 足够小，以至它的存在并不影响待测量的强度的电场。在场中某点的电场强度数值上等于场施加于处在该点单位正“试验”点电荷的力，它的方向与此作用力的方向一致。

静电场强度与时间无关。如果场中所有各点的强度 $\boldsymbol{E}$ 相同，就称它是均匀静电场，反之称为非均匀静电场。

静电场可以通过画出力线来作形象表示。力线是以这样的方法想象画出的线：它们在任一点的方向（即切线方向）与电场在该点上的电场强度矢量方向相同。静电场的力线是一些开放的曲线，它们从正电荷出发，在负电荷中止（特别是它们可伸向无限远，或来自无限远）。根据电场强度矢量方向，或简单称为场矢量的单值性，可以知道力线是不会相交的，只有当场是均匀的（这种场的力线是一组平行直线）以及粒子的初速度是沿力线方向时，自由电荷粒子在场中运动的路径才与场的力线重合。

1-2-4 由固定不变的电荷系统 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 所建立的场施加于试验电荷 q_0 的合力 $\boldsymbol{F}$ ，等于由每个电荷 q_i 的场施加于试验电荷的作用力 $\boldsymbol{F}_i$ 的矢量和，即

$$\boldsymbol{F} = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{F}_i.$$

这便得出电场的迭加原理：

$$\boldsymbol{E} = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{E}_i.$$

点电荷系统的电场强度等于每个电荷独立建立的场强的矢量和。

对于连续分布的电荷，

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E},$$

这里积分是沿电荷分布的区间进行, 所以

(a) 如果电荷是沿直线分布, 其线密度 $\tau = \frac{dq}{dl}$ (dq 是线元长度 dl 的电荷), 积分是沿直线进行;

(b) 如果电荷是沿表面分布, 其面密度是 $\sigma = \frac{dq}{dS}$ (dS 是表面的面积元), 积分是沿表面进行;

(c) 如果电荷是按体积分布, 其体密度 $\rho = \frac{dq}{dV}$ (dV 是体积元), 积分是沿体积进行。

1-2-5 如果所研究的静电场包含有电介质, 那么需要区分两类电荷: 自由电荷和束缚电荷。电介质的原子和分子组成中的电荷, 以及具有离子晶格的结晶电介质中的离子属于束缚电荷。所有其它的电荷称为自由电荷, 比如金属中的传导电子; 气体和电解质中的离子; 以及传送到导体或非导体, 改变它们的电中性所增加的这部分电荷就属于自由电荷。在这种情况下, 电场强度 $\mathbf{E}$ 等于自由电荷建立的电场强度 $\mathbf{E}_0$ 和束缚电荷建立的电场强度 $\mathbf{E}_p$ 的矢量和, 即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_p.$$

在下面将讨论的各种静电场的例子中均假定, 自由电荷周围的介质是各向同性的电介质, 并且在整个场的范围内, 或在等势面(参见1-4-7)所包围的范围内是均匀的。在这些条件下,

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{K_0},$$

式中 K_0 是场中观察点介质的介电常数(相对电容率)。这意味着, 对于给定的自由电荷分布, 在真空中的静电场强度比在

均匀各向同性电介质中大 K_e 倍(有时也称它为普遍形式的库仑定律)。

1-2-6 点电荷 q 的静电场强度等于

用国际单位制:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{K_e r^2} \frac{\mathbf{r}}{r},$$

用绝对静电制:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{K_e r^2} \frac{\mathbf{r}}{r},$$

式中 $\mathbf{r}$ = 从点电荷到场中观察点所作的矢径;

K_e = 介质的介电常数(相对电容率);

ϵ_0 = 自由空间的电容率。

电场强度的数值是

用国际单位制:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{K_e r^2},$$

用绝对静电制:

$$E = \frac{q}{K_e r^2}.$$

1-2-7 点电荷系统 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 的静电场强度等于

用国际单位制:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{K_e r_i^2} \frac{\mathbf{r}_i}{r_i},$$

用绝对静电制:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{K_e r_i^2} \frac{\mathbf{r}_i}{r_i}.$$

特别是对于电偶极子,它是数值上相等但带电符号相反、彼此相距的长度 l 比至观察点的距离 r 小的两个电荷 $+q$ 和 $-q$ 的电荷系统,它产生的电场强度 $\mathbf{E}$ 是

用国际单位制:

$$\mathbf{E} = \frac{3(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 K_e r^5} - \frac{\mathbf{p}_e}{4\pi\epsilon_0 K_e r^3},$$

用绝对静电制:

$$\mathbf{E} = \frac{3(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{K_e r^5} - \frac{\mathbf{p}_e}{K_e r^3},$$

式中 $\mathbf{p}_e = ql$ 是电偶极矩, 或简称偶极矩. 矢量 $\mathbf{l}$ 是从负电荷指向正电荷.

在坐标原点位于偶极子中间并且极轴平行于 $\mathbf{p}_e$ 的球面坐标系 r, θ, φ 中 (见图 1-2), 则其电场强度分量分别为

用国际单位制:

$$E_r = \frac{p_e \cos \theta}{2\pi\epsilon_0 K_e r^3},$$

$$E_\theta = \frac{p_e \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 K_e r^3},$$

$$E_\varphi = 0,$$

用绝对静电制:

$$E_r = \frac{2p_e \cos \theta}{K_e r^3},$$

$$E_\theta = \frac{p_e \sin \theta}{K_e r^3},$$

$$E_\varphi = 0.$$

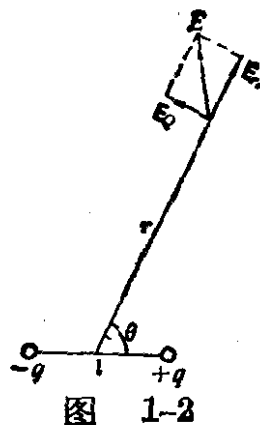
电场强度矢量的值是

用国际单位制:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{K_e r^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1},$$

用绝对静电制:

$$E = \frac{p_e}{K_e r^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}.$$



1-2-8 在均匀带电无限长直线和表面带电圆柱体外部空间或两个共轴圆柱体(如同轴电缆或圆柱形电容器)之间的空间,它们建立的静电场强度是

用国际单位制:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 K_e r} \frac{r}{r},$$

用绝对静电制:

$$E = \frac{2\tau}{K_e r} \frac{r}{r},$$

式中 τ —线电荷密度;

r —从圆柱体轴线至观察点最短距离的矢径.

在圆柱体内部的电场强度 $E_i = 0$.

1-2-9 由均匀带电无限大平面建立的均匀静电场强度是用国际单位制:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0 K_e},$$

用绝对静电制:

$$E = \frac{2\pi\sigma}{K_e},$$

式中 σ 是电荷面密度.

1-2-10 在两个均匀带电、带电符号相反无限大的平行平面之间产生的静电场强度是

用国际单位制:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 K_e},$$

用绝对静电制:

$$E = \frac{4\pi\sigma}{K_e},$$

式中 σ 是两个平面的表面电荷密度绝对值.

1-2-11 由半径为 R 、电荷 q 沿表面均匀分布的球建立的静电场强度, 与由置于球心的点电荷 q 在球外建立的电场强度相一致, 即

用国际单位制:

$$E = \frac{qr}{4\pi\epsilon_0 K_e r^3},$$

用绝对静电制:

$$E = \frac{qr}{K_e r^3}.$$

在球内部的电场强度 $E_i = 0$.

1-2-12 由电荷沿整个体积均匀分布, 且体积密度为 ρ 、半径为 R 的球所建立的静电场强度为

用国际单位制:

对于 $r \geq R$:
$$E = \frac{\rho}{3\epsilon_0 K_e} \left(\frac{R}{r}\right)^3 r,$$

对于 $r \leq R$:
$$E = \frac{1}{3\epsilon_0 K_e} \rho r.$$

用绝对静电制:

对于 $r \geq R$:
$$E = \frac{4}{3} \frac{\pi}{K_e} \rho \left(\frac{R}{r}\right)^3 r,$$

对于 $r \leq R$:
$$E = \frac{4}{3K_e} \pi \rho r.$$

§ 1-3 电位移 奥斯特洛格拉德斯基-高斯电通量定理

1-3-1 电位移(静电感应) D 是表征电场特性的矢量. 对于在真空中的场

用国际单位制: