

/// 高校规划教材 • 物理学

大学物理学

Daxue Wulixue

下

王亚伟 主编

中国科学技术大学出版社

21 世纪高校规划教材 · 物理学

大学物理学

◇ 下 册 ◇

王亚伟 主编

中国科学技术大学出版社

合 肥

内 容 简 介

本书是在教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”相关研究成果及其精神指导下,依据教育部制定的《高等工业学校大学物理基本要求》,应用江苏大学京江学院“新概念物理学”的项目研究成果所编写的规划教材。全书分上、下两册。上册主要内容:力学、相对论和热学,下册主要内容:电磁学、光学和近代物理。本书以物理学学科的研究内涵为编著线索,在保持物理理论基础性强的同时,加强了物理学原理应用新技术的介绍,力图体现本书高视点、厚基础、宽应用、新体系的时代特征。

本书可作为高等学校非物理专业的教科书,尤其适用于民办类学院各专业的使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学·下/王亚伟主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2004. 6
21 世纪高校规划教材·物理学
ISBN 7-312-01669-3

I. 大… II. 王… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 008905 号

书 名:大学物理学(下)

著作责任者:王亚伟

责任编辑:农 夫

标准书号:ISBN 7-312-01669-3/O·284

出 版 者:中国科学技术大学出版社

地 址:合肥市金寨路 96 号中国科学技术大学校内 邮编:230026

网 址:<http://www.press.ustc.edu.cn>

电 话:发行部 0551-3602905 邮购部 3603735 编辑部 3602910

电子信箱:press@ustc.edu.cn

印 刷 者:合肥学苑印务有限责任公司

发 行 者:中国科学技术大学出版社

经 销 者:全国新华书店

787mm×960mm 1/16 14.75 印张 336 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1—5000 册

定 价:17.00 元

《大学物理学》编写委员会名单

主 编 王亚伟

编 委 王亚伟 王纪俊 许伯强

葛一兵 张九如

* * * * *

策划编辑 张善金

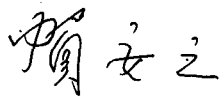
序

物理学是自然科学的基础，又是现代最具有活力的带头学科，它主导了当代新技术革命的前沿高新技术和学科，例如：空间科学，微电子技术，光电子技术，纳米材料技术，现代生物基因工程，分子生物学，信息技术等等，都是基于物理学的基础而发展起来的，即使是生命科学、现代量子化学等，也是在现代物理学技术和量子理论物理学发展的带动下才迈进了崭新的阶段。可见，物理学是人类认识自然，改造自然，创造物质财富，推动社会进步的一个重要理论和技术源泉。物理学的基本理论、基本思想、分析和解决问题的方法对科技创新有着重要的与决定性的作用。

今天的物理学，一方面，与其他学科相互渗透，相互融合，共同发展，并且形成了许多新的交叉学科；另一方面，一些老的技术学科从物理学中吸取营养，出现了技术科学与物理学相互交织的景象。工程技术的发展必须以物理学的先行研究为基础，才能得以实现。因此，必须经过物理学基础理论的系统学习，才能培养出具有坚实理论基础和具有创新能力的工程技术人才。

王亚伟博士集多年物理学教学经验与教学研究成果，在其主研的“新概念物理学”项目的研究成果基础上，以物理学科学内涵为线索，以科学技术创新思想与技术方法为培养目的，针对应用型工程技术人才的培养要求，注重素质培养和素质教育，既系统地阐述了物理学的基本原理和方法，又融合物理学的新进展，特别是体现

了物理学在现代知识创新、技术创新中的应用成果，以培养学生在未来工程技术研发工作中的创新能力。全书包含了力学、振动与波、热学、电磁学、光学与近代物理学等内容，体系完整、内容新颖，是一本适合当今我国大学物理学教学的、能在培养出具有坚实理论基础和创新能力的工程技术人才中起到较大作用的一部好教材。



2004年1月8日于南京

贺安之先生为南京理工大学教授，博士生导师，曾长期任南京理工大学理学院院长，现任中国光学学会全息与信息处理专业委员会主任，江苏省激光与光学工程学会理事长。——编者

前 言

科学技术的不断进步和高新技术的迅速发展,极大地推动了世界经济的发展。世界经济的发展又极大地刺激了人们对人才的需求,这种需求促使人才的素质内涵和知识结构发生着巨大的变化。作为科学技术的基础学科——物理学既是一切科学技术的基础,又是所有学科中的一个主导学科,所以一直是高等教育中的一个重要教学学科。近年来该学科随着科学技术的不断进步也一直发生着相应的变化,这主要反映在:

(1) 新理论、新原理、新技术、新方法层出不穷,不断丰富着物理学内容。例如:超导理论、信息熵理论、等离子技术、激光原理与应用技术、光波导理论与应用技术,等等。

(2) 不同学科和技术本身的发展对物理学有着不同的要求,促进了物理学从不同的方向形成了自身不同的发展特征。例如:生物物理学、非线性物理学、纳米材料技术、计算机科学、通信与通讯技术等的发展,极大地促进了物理学的发展。

(3) 作为大学物理学教育的前期教育——中学物理学教学已经从内容和方法上进行了较大的改革,并且取得了相关的应用成果。

(4) 新技术的应用改变了物理学的实验手段和方法,从而对依赖于物理实验的物理学科产生了变化。例如:多媒体教学技术、计算机网络技术、计算机虚拟实验技术与图像处理与显示技术的发展极大地改变了物理学教学的方法和手段。

同时,高等教育的发展出现了多层次、多类别、多模块的教学需求,窗口课程、专业课程的发展又提出了对物理课程压缩学时的要求。尤其是二级民办

学院的迅猛发展为社会培养了大量的高级应用型专业技术人才,但是,作为一个重要的基础学科的教材——物理学的教材却存在着体系和内容上的陈旧,课时设置模块少,不适应要求等诸多问题,对此,大学物理学的课程改革已迫在眉睫,改革的呼声已在全球物理学教育界达成了共识。但是,怎样改革,改什么却存在着种种见解。作者以二级民办学院学生为教学对象,针对其培养目标和自身知识基础的状况,本着以素质教育为目的,物理方法和物理思想教育为本,在传授物理知识的同时更注重物理学技术应用的培养,对非物理类大学物理学课程的物理学教材从以下几个方面进行了改革:

(1) 提高教材基础层面,有效地减少大学与高中物理学教学的机械重叠层,节省空间以充实体现物理基础知识的新技术和新方法的教学内容。

(2) 精炼内容,以物理学的科学性和逻辑性为线条,从单体物质到多体物质,从经典到近代,从线性到非线性重构物理学教材体系,有效地缩短学时数。

(3) 以物理学的基础知识导入各个章节,各章内容中重视数学建模的技能训练和物理学思想方法的教育,深入浅出,增强综合素质教育训练的例题和习题,最终回归于实际应用。

(4) 对于新的实用性技术和物理学理论性较强但应用性较少的内容,以阅读性材料的形式提供给同学们选读,以拓宽同学的知识面,培养同学们的自学能力。

本物理学教材是以江苏大学京江学院立项的“新概念物理学教材的研究”项目研究成果为支撑,在吸取了编者多年对二级民办学院学生教学的经验和其他优秀物理学教材之精华的基础上编著而成。本书共分十章,第一章、第四章、第九章由王亚伟执笔,第二章由葛一兵执笔,第三章由许伯强执笔,第五、六、七章由张九如、许伯强共同执笔,第八章由王纪俊执笔,第十章由许伯强、王纪俊共同执笔,全书由王亚伟博士、教授统稿总撰。本教材分上、下两册,上册主要讨论了力学、相对论和热力学内容;下册主要讨论了电磁学、光学和近代物理内容,书中凡注*号的内容均为选学内容,建议学时为90个学时~110个

学时。

本书在编著过程中得到了江苏大学物理系全体同仁的大力支持，刘映栋教授在百忙中抽出时间认真审阅了本书的内容，对本书的内容和体系创新提出了极为宝贵的修改意见；贺安之教授获悉本书出版，十分高兴，欣然为本书作序，对本书的出版给予了热情的支持和帮助，在此一并致以深切的感谢！

由于我国高等教育教学体制改革的不断深化，知识创新成果的大量涌现，加上作者的水平所限，书中疏漏和不足之处在所难免，诚望读者不吝赐教。

编 者

2003年10月12日

目 录

序.....	(I)
前言.....	(III)
第 8 章 电磁场.....	(1)
8.1 稳恒电磁场的描述.....	(1)
8.1.1 电场强度.....	(1)
8.1.2 磁感应强度.....	(9)
8.2 高斯定理.....	(13)
8.2.1 电通量和静电场的高斯定理.....	(13)
8.2.2 磁通量和磁场的高斯定理.....	(21)
8.3 稳恒电 (磁) 场的环路定理.....	(22)
8.3.1 静电场的环路定理.....	(22)
8.3.2 电势与电势叠加原理.....	(24)
8.3.3 稳恒磁场的安培环路定理.....	(31)
8.4 物质中的电场和磁场 (介质中的电磁场)	(35)
8.4.1 静电场中的导体.....	(35)
8.4.2 静电场中的电介质.....	(39)
*8.4.3 电容.....	(44)
*8.4.4 介质中的磁场.....	(49)
8.5 带电粒子在电场和磁场中的运动 (电场和磁场对带电粒子的作用)	(56)
8.5.1 洛仑兹力.....	(56)
8.5.2 洛仑兹关系式及应用举例.....	(58)
8.5.3 安培力.....	(63)
8.5.4 磁力的功.....	(69)
8.6 电磁感应.....	(71)
8.6.1 法拉第电磁感应定律.....	(71)
8.6.2 动生电动势与感生电动势.....	(76)

*8.6.3 自感与互感·····	(82)
8.7 位移电流 麦克斯韦电磁场理论·····	(87)
8.7.1 位移电流·····	(87)
8.7.2 麦克斯韦方程组·····	(90)
*8.7.3 电磁场的能量·····	(91)
第9章 波动光学 ·····	(99)
9.1 光波的特征与光波的描述·····	(99)
9.1.1 发光机制·····	(100)
9.1.2 光波的表述·····	(101)
9.1.3 光波相干性·····	(102)
9.2 光的偏振·····	(104)
9.2.1 偏振光与自然光·····	(104)
9.2.2 偏振光的获取方法·····	(106)
*9.2.3 光的双折射·····	(111)
9.3 光的干涉·····	(121)
9.3.1 相干光的获取方法·····	(123)
9.3.2 分波前干涉(杨氏双缝干涉)·····	(124)
9.3.3 分振幅干涉·····	(130)
*9.3.4 偏振光的干涉·····	(145)
9.4 光的衍射·····	(147)
9.4.1 惠更斯-菲涅耳原理·····	(147)
9.4.2 单缝衍射·····	(148)
9.4.3 光栅衍射·····	(152)
9.4.4 圆孔衍射与分辨本领·····	(158)
*9.4.5 X射线衍射·····	(161)
*9.5 激光原理及其应用·····	(164)
9.5.1 原子在能级上的分布·····	(164)
9.5.2 自发辐射与受激辐射·····	(165)
9.5.3 原子数反转与光放大·····	(166)
9.5.4 光学谐振腔·····	(167)
9.5.5 激光器工作原理·····	(169)
9.5.6 激光的特征及其应用·····	(170)

第 10 章 量子力学基础	(175)
10.1 能量量子化	(175)
10.1.1 黑体辐射	(175)
10.1.2 普朗克假设	(177)
10.2 波粒二象性	(178)
10.2.1 光电效应	(178)
10.2.2 康普顿效应	(181)
10.2.3 德布罗意波 微粒的波动性	(183)
10.2.4 不确定关系	(187)
10.3 量子力学方程 (薛定谔方程)	(188)
10.3.1 波函数	(188)
10.3.2 定态薛定谔方程	(191)
10.3.3 一维势阱	(192)
10.3.4 一维势垒和隧道扫描效应	(194)
10.4 原子核和基本粒子简介	(197)
10.4.1 原子核	(197)
10.4.2 基本粒子简介	(202)
下册习题与综合训练	(207)
参考文献	(221)

第8章 电 磁 场

电磁运动是物质运动的一种基本运动形式，是自然界已知的四种基本相互作用之一。电磁学主要是研究电荷、电场和磁场的基本性质和基本规律及其相互联系的科学。

在人类发展过程中，很早就认识了一些电和磁现象，如摩擦起电现象、磁铁吸铁现象等，并发明了指南针用于航海事业。作为一个完整的理论，其主要工作是在 19 世纪完成的，1873 年，麦克斯韦 (J.C.Maxwell) 在总结了前人大量的研究成果的基础上，提出了涡旋电场和位移电流的假说，揭示出电场和磁场间的相互关系，系统地把电磁学规律归纳成一组方程，建立了统一的电磁场理论，并由此预言了电磁波的存在，同时建立了光的电磁理论。至此，描述客观电磁场的经典电磁理论完全确立。

电磁场理论的发展已对工农业生产、科学研究和人类的日常生活产生了极其重要的影响，也成为人类认识自然世界、进行科学探索、创造物质财富、日常物质和文化生活中必不可少的基本理论。同时电磁场理论也是很多其他基础学科和应用技术，如电工电子学、无线电技术、计算机技术（硬件）、无线通讯、卫星导航等必需的理论基础。

本章主要介绍电场和磁场的描述及电场和磁场的基本性质、介质中的电场和磁场、电磁感应现象及麦克斯韦电磁场理论，全章共分七节。

8.1 稳恒电磁场的描述

8.1.1 电场强度

电荷及其性质 人类对电的认识最初来自摩擦起电。美国的富兰克林 (B.Franklin, 1706~1790) 在实验的基础上指出：自然界只存在两种电荷即正电荷和负电荷。同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

由物质的电结构理论可知，各种物质都是由分子、原子组成。原子由原子核及核外电子组成，原子核又由质子和中子组成。电子带负电、质子带正电、中子不带电。通常状态下物质呈电中性，因为此时原子中的质子数和核外电子数相等。当两种不同物质相互摩擦时，可使一物体失去电子而带正电，而另一物体得到电子而带负电。

物体所带电荷数量的多少，称为电量，常用 Q 或 q 表示。在 SI 制中的单位是库仑，

记作 C 。实验证明,电子是自然界中带电量最小的粒子,其带电量为 $e=1.602 \times 10^{-19}C$ 。所有其他带电体或带电粒子的电量都是电子电量绝对值的整数倍,即物体带电量是不连续的,这称为电荷的量子化。

摩擦起电、感应起电等事实表明,任何物体带电的过程,都是使物体中原有的正、负电荷分离或转移的过程。一个物体失去一些电子,必有其他物体获得这些电子。实验证明:在一个孤立系统中,无论发生怎样的物理过程,系统所具有的正负电荷电量的代数和总量保持不变,这就是电荷守恒定律。

库仑定律 电荷间有相互作用力。1785 年,法国物理学家库仑 (C.A.Coulomb, 1736~1806) 利用扭秤实验对真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力进行了定量的研究,总结出真空中点电荷间的相互作用规律,即库仑定律:

真空中两个静止点电荷之间的作用力 F 的大小与这两个点电荷电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比;作用力 F 的方向沿着这两个点电荷连线方向,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

所谓点电荷是指当带电体的线度与研究的两带电体之间的距离相比很小,可以忽略时该带电体可看作点电荷。和质点模型类似,点电荷同样是一个理想化的物理模型。

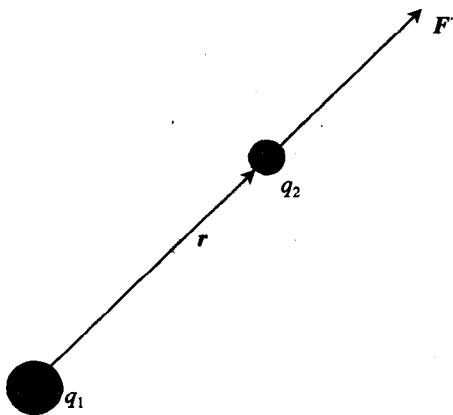


图 8-1

如图 8-1 所示,用 F 表示点电荷 q_2 受到点电荷 q_1 的作用力, r 表示由点电荷 q_1 指向点电荷 q_2 的矢量(或称以点电荷 q_1 为原点表示的点电荷 q_2 的位置矢量),则库仑定律可由如下式子表示:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0$$

式中, r_0 为矢量 r 的单位矢量, k 是比例系数,在 SI 制中 $k=8.98755 \times 10^9 N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$ 。

为使以后其他常用公式的形式简单一些, 我们把 k 表示为如下形式:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

式中, ϵ_0 叫做真空中的介电常数, 也叫真空电容率, 其值为:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85419 \times 10^{-12} (\text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$$

于是真空中的库仑定律可写为:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-1)$$

应当注意: 上式矢量表示中包含着库仑定律中的同号电荷相互排斥, 异号电荷相互吸引的内容。当 q_1 和 q_2 同号时, q_1 和 q_2 之积为正, 此时 F 的方向平行于 $\mathbf{r}_0$; 当 q_1 和 q_2 异号时, q_1 和 q_2 之积为负, F 的方向和 $\mathbf{r}_0$ 的方向相反, 指向 q_1 。

电场 早期的电磁理论认为两个相隔一定距离的带电体、磁体和磁体、磁体和电流间的相互作用是所谓超距作用, 即这些作用, 既不需要介质传递, 也不需要时间。从法拉第 (M. Faraday, 1791~1867) 开始到麦克斯韦, 许多科学家在大量的实验事实基础上, 经过分析研究, 逐渐形成了电场和磁场的概念, 认为电磁相互作用是通过电场和磁场来传递的, 场的概念也成为物理学中最主要的基本概念之一。

按照场的观点, 任何电荷都将在它周围的空间中激发出一种物质, 叫电场, 电场能对处于其中的任何其他带电体施加力的作用, 这种力称为电场力。因此, 电荷之间通过电场实现了相互作用。即场同样也是一种物质。现代科学和实验证明, 场是物质存在的一种形式。在一定条件下, 电磁场可以脱离电荷和电流单独存在, 具有自己的运动规律。电磁场和实物物质一样具有质量、能量、动量等性质。

本节主要研究的是由相对于观察者静止的电荷在其周围空间激发的电场, 称为静电场。静电场是电磁场的一种特殊形态。

电场强度 为研究电场的性质, 我们首先从处于场中的电荷所受的作用力角度出发, 引入电场强度的概念。

在所要研究的静电场中引入一正的试验点电荷 q_0 , 要求其电量和线度都很小, 不会影响原有静电场的分布。

实验表明, 改变试验电荷所带电荷 q_0 的量值, 试验电荷所受电场力 F 的大小将与试验电荷电量成正比变化, 而力的方向不变。即对给定的静电场而言, 其中某一点处试验电荷所受静电场作用力 F 和试验电荷电量 q_0 之比值 F/q_0 具有确定的大小和方向, 这说明该比值与试验电荷无关, 而只与静电场本身有关, 反映了静电场本身的性质。我们将此比值称为该静电场的电场强度, 简称场强, 用 E 表示:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8-2)$$

由(8-2)式可知, 电场中某点的电场强度矢量, 在量值上等于单位正电荷在该点处所受电场力的大小, 方向与单位正电荷受电场力方向一致。在 SI 制中, 电场强度的单位是牛顿·库仑⁻¹ (N·C⁻¹) 或伏·米⁻¹ (V·m⁻¹)。

由电场强度的定义可知, 一具有电量为 q 的电荷在电场中某点受电场力可表示为:

$$F = qE \quad (8-3)$$

显然, 正电荷受力方向和场强方向相同, 而负电荷受力方向与场强方向相反。

【例题 8-1】 求点电荷的场强分布。设真空中有一带电量为 q 的点电荷, 求距离该点电荷为 r 处的 P 点的场强。

解: 设在距离点电荷 q 为 r 处放置一试验点电荷 q_0 , 由库仑定律可知, 作用在 q_0 上的电场力 F 为:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} r_0$$

式中, r_0 为从 q 指向 q_0 的矢量 r 的单位矢量。则由场强定义(8-2)得点电荷产生的场强为:

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0 \quad (8-4)$$

讨论: 由于 P 点是任意的, 故上式可表示点电荷产生的电场中任一点的电场强度。由(8-4)式可以看出, 点电荷产生电场的场强大小和该电荷的电量大小成正比, 而与该点电荷到讨论点的距离 r 的平方成反比。当 q 为正电荷时, 场强方向沿点电荷到讨论点 P 连线方向, 向外; 当 q 为负电荷时, 场强方向指向该点电荷。显然, 点电荷的场强具有球对称性。

场强叠加原理 前面我们提到了“场”的概念, 并开始讨论静电场的性质。物理学中的场具有叠加性, 下面我们就电场的叠加性作一讨论。

设空间中有 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$, 可称为点电荷系。每个点电荷均在空间中激发电场, 现讨论空间中总电场的规律。根据力的叠加原理, 试验电荷 q_0 在空间中某点 P 所受电场力为:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$$

式中, $F_1, F_2, \dots, F_n$ 为 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时对 q_0 的作用力。将上式两边同除以 q_0 可得:

$$E = \frac{F}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n E_i$$

式中, $E_1, E_2, \dots, E_n$ 分别代表 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时 P 点的场强, 上式表示点电

荷系在空间中某点所激发的电场等于各点电荷单独存在时激发的电场的矢量和, 即场强叠加原理。

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i, \quad \mathbf{E}_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_{oi} \quad (8-5)$$

式中, r_i 表示第 i 个点电荷到讨论的 P 点的距离, $\mathbf{r}_{oi}$ 表示第 i 个点电荷指向 P 点的单位矢量。

应当注意的是, 场强的叠加是矢量和, 具体计算时要用矢量的加法进行计算。

连续带电体产生的场强计算 点电荷系产生的电场的场强可按公式 (8-5) 计算, 而对于连续带电体产生的场强需要用微积分思想来计算。所谓连续带电体是指其电荷分布在宏观上看是连续的, 用 (8-5) 式不能直接求出电场强度的总和, 但可以把连续带电体先微分, 看成是由很多个极小的电荷元 dq 的集合, 每一个电荷元 dq 看作是点电荷。先求出 dq 这一电荷元产生的场强 $d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0$, 然后对整个连续带电体求积分得总场强

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

上述过程是一个典型的微积分过程, 先微分, 再积分。计算过程有两个问题需要特别注意:

1. dq 的求法

连续带电体的电荷分布可能是分布在一定的体积内、一定的曲面上或为一线性带电体上。为求得电量 dq , 先引入对应的电荷体密度、电荷面密度、电荷线密度。

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} = \frac{dq}{dv}$$

$$\sigma = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s} = \frac{dq}{ds}$$

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}$$

由上面三式可得对应于三种电荷分布时, 体积微元 dv 、面积微元 ds 、长度微元 dl 上的带电量 dq 分别为: $dq = \rho dv$, $dq = \sigma ds$, $dq = \lambda dl$ 。

2. 求 $\mathbf{E} = \int d\mathbf{E}$ 的积分过程

由 $d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0$, 此式中 r 为点电荷元 dq 到讨论点的距离, $\mathbf{r}_0$ 为由点电荷元指向讨论点的单位矢量。再对 $d\mathbf{E}$ 求积分 $\mathbf{E} = \int d\mathbf{E}$ 。

要特别注意的是 $\mathbf{E} = \int d\mathbf{E}$ 是一个矢量积分, 必须要先分解再分别求出各分量积分, 最后合成为 $\mathbf{E}$ 矢量, 为此要先建立坐标系, 对 $d\mathbf{E}$ 矢量进行投影, $d\mathbf{E} = dE_x \mathbf{i} + dE_y \mathbf{j} + dE_z \mathbf{k}$,