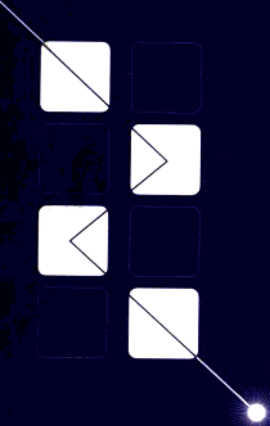




雷电防护系列教材

南京气象学院电子工程系、
防雷工程技术中心 组编



雷电学 原理



◎ 陈渭民 编著

气象出版社

29150

雷电防护系列教材

雷电学原理

南京气象学院 电子工程系 组编
防雷工程技术中心

陈渭民 编著



气象出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了晴天大气电过程、云雾降水电过程和云雾中的起电机制,重点介绍了雷暴云闪电、雷电的物理效应、雷电的监测原理和方法、雷电的气候特征和全球大气电输送。全书共分十章,第一章讲述静电学基础知识;第二至四章主要叙述晴天大气带电粒子(离子)、大气电场、大气电流、大气电导率等大气的基本电特性知识;第五、六章讲述云雾粒子的带电特征,各类云、特别是雷暴云电荷结构和雷暴云起电的理论;第七章为闪电的结构、类型、闪电的电场、电流参数和形成机制,闪电与雷暴云等;第八章为雷电的物理效应,主要讲述闪电的电磁辐射理论,雷、闪电的光谱;第九章是雷电的监测方法,介绍大气电场、磁场和电流的观测方法,特别是雷电的定位方法,卫星监测雷电的介绍;第十章为雷电的气候特征,着重介绍我国雷电的分布规律,全球雷电分布和全球大气电的输送,以及太阳对大气电的影响。

本书是高等院校大气科学、雷电防护专业的教科书,也可以作为气象台站从事雷电防护、雷电预警和电力、通讯、建筑、国防等从事雷电研究工作和雷电防护工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

雷电学原理/陈渭民 编著. —北京:气象出版社,2003. 11
ISBN 7-5029-3675-0

I. 雷... II. 陈... III. ①雷—大气电学②闪电—大气电学 IV. P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096966 号

雷电学原理

陈渭民 编著

责任编辑:吴晓鹏 终 审:汪勤媛

封面设计:世纪白马 责任技编:王丽梅 责任校对:王丽梅

出版发行:气象出版社

出版社地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

出版社电话:010-68407112

电子邮箱:cmp01@263.net

出版社网址: <http://cmp.cma.gov.cn>

邮政编码:100081

传真号码:010-62176428

印 刷:北京昌平环球印刷厂

开 本:787mm×960mm 1/16

印 张:24

字 数:483千字

定 价:32.00元

版 次:2003年11月第1版

印 次:2003年11月第1次印刷

印 数:0001~5000

版权所有 侵权必究

前 言

雷电是自然界最壮观的和重要的大气现象之一,伴随雷电有声、光、电等多种的物理现象,电学的发展就来自闪电的研究。早在 1752 年美国科学家富兰克林对闪电进行了深入研究,揭示了闪电的本质。雷电引起人们的广泛关注,是大气科学的重要研究对象,特别是近几十年来,随着人们对闪电探测手段的提高,对它进行了大量研究,取得了大量的研究成果,对雷电的形成机制、活动规律有深入的了解,并形成雷电学这一学科。

在自然灾害中,雷电引起的灾害是世界上十大自然灾害之一。一道夺目的闪光划破昏暗的长空,紧接着是震耳欲聋的霹雳雷声,它阴森可怖,像恶魔一般,喷射出狂风暴雨,雹击雷轰,它威胁、杀戮,雷电对人类、人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质文明构成巨大的威胁,雷电不仅发生的频率高,而且年年发生。据估计,全世界每年约有 10 亿次雷暴发生,平均每小时发生 2000 次雷暴,而每分钟平均发生 1~3 次云对地闪电。就整个地球表面而言,每秒钟的地闪就有 30~100 次,而在地球表面各地,有时顷刻间就有 2000 个左右的闪电,平均每天发生闪电 800 万次,每次闪电在微秒量级的瞬间释放出约 1.98×10^8 焦耳的能量。如森林火灾有 50% 以上是由雷电引发的。

随着经济和现代科学技术的发展,雷电灾害造成巨大的经济损失,其危害程度大大地加大,据有关资料统计,全世界每年因雷击造成的经济损失达 10 亿美元以上;同时从事户外活动的人和畜遭遇雷击伤亡人数逐年增多,我国每年因雷击的伤亡人数达 10500 人左右。特别是对于高新技术的发展,计算机广泛应用于各个领域,雷电灾害具有巨大的破坏性,它的产生是目前人类无法控制和阻止的,雷电的放电电压高,可达 500kV 以上,闪电峰值电流的幅度大,高达 100~300kA,闪电电流变化快,放电过程时间短,一次放电时间约为 40 μ s;同时雷电表现为强大的冲击波、剧变的电磁场、强烈的电磁辐射、炽热的高温。当今雷灾的新特点表现为:

1. 受灾面大大扩大。从电力到建筑扩展到几乎所有的部门。如航天航空、国防、通讯、计算机、电力输送、电子工业、石油化工、电厂、矿山、铁路干线等。
2. 从二维空间入侵到三维空间侵入,从闪电直击,过电压波沿线传输到空间脉冲电磁场从三维空间入侵到任何角落,防雷工程已从防直击雷、感应雷进入到防止雷电脉冲,雷电灾害的空间范围大大地扩大了。
3. 随着经济的发展,雷电灾害的经济损失和危害程度大大地加大,特别是由于高新技术的迅速发展,如像火箭的发射、银行计算机系统、通讯系统遭受到雷击后,其损失是显而易见的。

4. 雷击对象增多,如今高层建筑越来越多、电视塔越来越高、高压电线、储油罐,计算机网络、火箭、社会公共服务电子系统(公交信号灯、消防等),家用电器,特别是微电子器件是一些低压器件,雷击的目标大大地增加了。

为尽可能减小雷电灾害带来的损失,近年来防雷工作在我国气象部门已开展,建立了一支防雷专业队伍。由此扩大了气象服务的内容,一些地区的气象部门经济效益明显提高。

本书是由作者在南京气象学院多年雷电学原理教学的基础上,对雷电学原理讲义进一步修改、补充而成的。第一章讲述静电学基础知识;第二至四章主要叙述晴天大气带电粒子(离子)、大气电场、大气电流、大气电导率等大气的基本电特性知识;第五、六章讲述云雾粒子的带电特征,各类云、特别是雷暴云电荷结构和雷暴云起电的理论;第七章为闪电的结构、类型、闪电的电场、电流参数和形成机制,闪电与雷暴云等;第八章为雷电的物理效应,主要讲述闪电的电磁辐射理论,雷、闪电的光谱;第九章是雷电的监测方法,介绍大气电场、磁场和电流的观测方法,特别是雷电的定位方法,卫星监测雷电的介绍;第十章为雷电的气候特征,着重介绍我国雷电的分布规律,全球雷电分布和全球大气电的输送,以及太阳对大气电的影响。

限于作者的能力和水平,错误、疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书承蒙中国气象局科技发展司的支持,在此表示感谢。

作者

2003. 8

目 录

前言

第一章 电学原理	(1)
§ 1.1 电荷	(1)
§ 1.2 库仑定理	(2)
§ 1.3 电场	(3)
§ 1.4 静电场的势	(5)
§ 1.5 连续分布的电荷产生的电场	(8)
§ 1.6 高斯定理和电通量	(9)
§ 1.7 导体	(12)
§ 1.8 电介质	(19)
§ 1.9 电流	(25)
§ 1.10 气体导电理论	(28)
§ 1.11 稳定电流引起的磁场	(29)
第二章 晴天大气带电粒子—离子	(35)
§ 2.1 大气气体成分和气溶胶	(35)
§ 2.2 大气电离源和电离率	(38)
§ 2.3 大气离子的形成过程	(42)
§ 2.4 大气离子迁移率和大气离子方程	(44)
§ 2.5 大气离子的时空分布	(55)
第三章 晴天大气电场	(58)
§ 3.1 大气电场的基本概念	(58)
§ 3.2 大气电场的空间分布	(59)
§ 3.3 大气电场的时间变化特征	(62)
§ 3.4 大气电场与气象条件	(66)
第四章 晴天大气电导率、大气体电荷和大气电流	(68)
§ 4.1 晴天大气电导率	(68)
§ 4.2 晴天大气体电荷	(72)
§ 4.3 晴天大气电流	(76)

第五章 云雾降水电结构和电场	(79)
§ 5.1 大气中云的类型和特点	(79)
§ 5.2 雷暴云概况	(82)
§ 5.3 云雾粒子的电荷	(84)
§ 5.4 云中大气电结构	(86)
§ 5.5 降水粒子荷电和降水电流	(105)
第六章 云雾和雷雨云荷电机制	(110)
§ 6.1 雷雨云的起电的电特点	(110)
§ 6.2 云雾粒子大气离子扩散的起电机制	(112)
§ 6.3 云中云滴起电机制	(117)
§ 6.4 积雨云底部大雨滴破碎正电荷的起电机制	(126)
§ 6.5 积雨云的温差起电机制	(127)
§ 6.6 雷雨云降水起电理论	(133)
§ 6.7 热带对流云起电机制	(134)
第七章 雷暴云闪电	(137)
§ 7.1 闪电的分类	(137)
§ 7.2 地闪概述	(142)
§ 7.3 闪电的初始击穿	(157)
§ 7.4 梯式先导	(160)
§ 7.5 连接过程	(165)
§ 7.6 回击	(166)
§ 7.7 箭(直窜)式先导	(175)
§ 7.8 连续电流	(179)
§ 7.9 地闪中的 J 和 K 过程	(183)
§ 7.10 正地闪	(185)
§ 7.11 人工触发闪电	(190)
§ 7.12 地闪形成机制	(195)
§ 7.13 云闪	(200)
§ 7.14 闪电与雷暴云间的关系	(205)
§ 7.15 尖端放电	(230)
第八章 雷电的物理效应	(233)
§ 8.1 雷电的电磁场效应	(233)
§ 8.2 闪电通道的半径、速度、能量和温度	(243)

§ 8.3	闪电电流模式	(265)
§ 8.4	雷电引起的天电和无线电噪声	(269)
§ 8.5	雷	(272)
§ 8.6	闪电与大气化学过程	(279)
§ 8.7	闪电光谱	(284)
第九章	雷电监测原理和方法	(289)
§ 9.1	闪电的照相观测方法	(289)
§ 9.2	大气电场和闪电电场的测量	(292)
§ 9.3	闪电电流的监测原理和方法	(303)
§ 9.4	闪电磁场的测量	(307)
§ 9.5	雷电的计数和定位	(308)
§ 9.6	美国国家闪电监测网	(314)
§ 9.7	卫星监测雷暴	(318)
第十章	雷暴气候特征和全球大气电输送	(324)
§ 10.1	雷暴活动参量	(324)
§ 10.2	我国雷暴的地理分布和气候特征	(326)
§ 10.3	我国雷暴活动的时间变化特征	(335)
§ 10.4	全球雷暴的气候特征	(338)
§ 10.5	地球和大气间的电输送	(343)
附录	雷电学电学量单位	(368)
参考文献	(371)

第一章 电学原理

§ 1.1 电 荷

与一般物质一样,电荷也是由一些不可分割的基本单元所构成,这种基本单元称为基本电荷 e ,一切物体所带的电荷是基本电荷 e 的整数倍。实验测定,基本电荷数值为 $e=1.60 \times 10^{-19}$ 库仑 $=4.80 \times 10^{-10}$ 静电单位

电荷分正、负电荷两种。在构成原子的三种粒子中,有两种是带电粒子,质子带正电荷,电子带负电荷。每一质子的电荷为 $+e$,电子的电荷为 $-e$,而中子是不带电的。质子与中子构成原子核,核中的质子数等于原子序数 Z ,在正常情况下,核外的电子数也等于原子序数 Z 。当核外的电子数不等于质子数 Z 时,原子处于游离状态,称为离子。电子数与 Z 的差数 n 称为离子的价数, n 价的离子带有电荷 $\pm ne$ 。在大气中存在有大量的带电粒子是以正负离子的形式出现的。

物体带电的多少称为电量,通常用 Q 或 q 表示。在国际单位制中,单位取库仑,符号 C。

在不带电物体内部,每一小体积内的质子数等于电子数,表现为中性状态。当这种平衡情况被破坏,如果一部分电子转移到另一物体上时,失去电子的物体就带正电,增加电子的物体就带负电。由于电子静止状态时的质量很小,约为 $m_e=9.11 \times 10^{-28}$ g,仅为质子质量的 $1/1833$,所以因电子转移引起带电物体质量的改变是十分小的,一般不易觉察出来。

电量守恒定理:在闭合系统内,电荷的代数和是一常数。这表明电荷不会凭空产生和消灭,如果有一定的正电荷产生,也必然有等量的负电荷产生。如在雷暴云起电过程中,正负电荷是成对生成的。现代物理研究表明,当一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子,这叫电子对的产生,同样当一个正电子与一个负电子相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子,这叫电子对的湮灭。

当同类电荷存在时它们相斥,而异类电荷相吸。当两个等量的正负电荷相吸合并时,电荷将消失,称之为放电。因此正负电荷总是成对出现和消失。

闪电过程是一个放电过程,闪电时产生的强电流就是云中的正电荷与负电荷相中和或与大地的正负电荷相中和消失的过程。

§ 1.2 库仑定理

1. 点电荷

从宏观平均角度考虑,可以认为电荷连续地分布于带电体上,又如果带电体比所讨论物体的距离要小很多,这时带电体可以看做为一个带电的点,称之为点电荷。如电子、质子等带电体可以看成为点电荷。

如对于雷云中荷电中心所带的电荷尺度相对于它影响的范围,可以近似地将雷暴云中的电荷中心作为点电荷。

2. 点电荷间的作用力

库仑做的实验表明,两个点电荷之间的作用力是它们间距离平方成反比,与荷电量成正比,写为

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

作用力的方向沿两点电荷的连线,电荷符号的异同表示为引力或斥力。为表示力的方向,库仑定理以矢量表示为

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12} \quad (1.2)$$

这里 \vec{F}_{12} 表示点电荷 1 对点电荷 2 产生的作用力。 \vec{r}_{12} 表示电荷 1 指向电荷 2 的矢径。在国际单位制中,距离以 m(米),力以 N(牛顿)为单位,实验测定比例常数 k 为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

如果选取距离以厘米,力以达因为单位,而选取电荷单位,使 $k=1$,这样的单位为静电单位,则有

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (1.3)$$

电荷的量纲为 $[q] = \text{M}^{1/2} \cdot \text{L}^{3/2} \cdot \text{T}^{-1}$, M 是质量单位, L 是长度单位, T 是时间单位。电荷的单位是库仑。静电力的方向与矢径 r 的方向一致,也就是由正电荷指向负电荷的方向。

如果引入真空介电常量 ϵ_0 , 取

$$k = 1 / (4\pi\epsilon_0)$$

式中 $\epsilon_0 = 1 / (4\pi k) = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$, 其中引入因子“ 4π ”, 称为单位制的有理

化。对 k 的这样取法使库仑定律的形式较为复杂,但在以后的有关电磁学定律中,表达方便些。这时库仑定律写为

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{r^2 r} \quad (1.4)$$

实验证实,点电荷在空气中时的相互作用力与真空中相差极小,所以上式对空气中的点电荷也成立。

3. 多个点电荷间的作用力

对于 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 组成的电荷体系,如以 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ 分别是各电荷单独存在时作用于另一点电荷 q_0 上的力,则由力的叠加原理, q_0 上总的受力为各个力之和,即

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum \vec{F}_i \quad (1.5)$$

在 q_1, q_2, \dots, q_n 和 q_0 静止的情况下,可由库仑定理表示为

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i \vec{r}_i}{r_i^2 r_i} \quad (1.6)$$

式中 r_i 是 q_0 与 q_i 之间的距离, $\frac{\vec{r}_i}{r_i}$ 为从点电荷 q_i 指向 q_0 的单位矢量。

§ 1.3 电 场

1. 电场的定义

由上面库仑定理,一个点电荷因为带电而作用于另一个点电荷,由于其带电而引起周围空间特性变化通常用电场来表示。描述电场大小的量用电场强度表示,它定义为:单位电荷 q 在电场中所受的作用力,即

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.7)$$

电场强度的方向与电荷受的作用力方向一致,采用极限表示为

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.8)$$

2. 点电荷产生的电场

一个点电荷 q' 在离它 r 远处所激发的电场强度为

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{qq'\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^2 q} = \frac{q'\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.9)$$

3. 多个静止的点电荷产生的电场

对于空间中 n 个点电荷在 P 点产生的电场强度为各个电荷单独产生的电场强度矢量之和。

$$\begin{aligned} \vec{E}(P) &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \frac{q_1 \vec{r}_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} + \frac{q_2 \vec{r}_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \dots + \frac{q_n \vec{r}_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{q_i \vec{r}_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \end{aligned} \quad (1.10)$$

对于静止电荷产生的电场称静电场,静电场对电荷的作用力称静电力。

在自然界中,如在云中的正、负电荷是等量成对存在的,如果正电荷 $+q$ 、负电荷 $-q$ 是点电荷,它们间的距离为 l ,这样的电荷系统称之为电偶极子,作为例子,下面计算电偶极子激发的电场。

如图 1.1 中,设有一对等量异号的电荷 $q_1 = -q, q_2 = +q$,间距为 l ,以两个点电荷的中点为坐标原点,则先计算在 X 轴上任一点 a 的电场强度为

$$\begin{aligned} E_a &= E_2 - E_1 = q/4\pi\epsilon_0 (r_a - l/2)^2 \\ &\quad - q/4\pi\epsilon_0 (r_a + l/2)^2 \\ &= 2r_a q/4\pi\epsilon_0 [r_a^2 - (l/2)^2]^2 \end{aligned}$$

同理可得在 Y 轴上 b 点的电场为

$$\begin{aligned} E_b &= E_2 \cos\varphi + E_1 \cos\varphi \\ &= [q/4\pi\epsilon_0 (r_b + l/2)^2 + q/4\pi\epsilon_0 \\ &\quad (r_b - l/2)^2] (l/2) / [r_b^2 + (l/2)^2]^{3/2} \\ &= lq/4\pi\epsilon_0 [r_b^2 + (l/2)^2]^{3/2} \end{aligned}$$

如果只考虑远场的情况, $r_a \gg l, r_b \gg l$,则上式为

$$E_a = 2ql/4\pi\epsilon_0 r_a^3 \quad E_b = ql/4\pi\epsilon_0 r_b^3$$

在上式中 ql 称为偶极子的电矩。如果两对电偶极子具有相同的电矩,则它们在远处产生相同的电场。

电场强度的单位:根据电场强度的定义,其单位为 N/C ,读作牛顿/库仑。

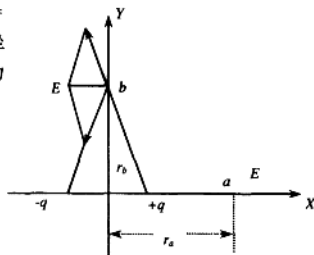


图 1.1 电偶极子的电场

§ 1.4 静电场的势

上面讨论了电场对电荷的作用力问题,既然电场对电荷有作用力,则当电荷在电场中移动时,必然要做功。根据功和能量的关系,可以确定电场与能量的联系。

1. 电场对试探电荷做的功

在图 1.2 中,电场对试探电荷做的功写为

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q\vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} ds \cdot \cos(\vec{r}, d\vec{s}) = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr \quad (1.11)$$

其中 dr 是 ds 在矢径 \vec{r} 上的投影。

在图 1.3 中,当 q 沿路径 L 做的功为对上式积分

$$\begin{aligned} A &= \int_L \vec{F} \cdot d\vec{s} = q \int_L \vec{E} \cdot d\vec{s} = q \int_L \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr \\ &= q \int_{r_1}^{r_2} \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = -\frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

式中 r_1 与 r_2 分别是电荷 q' 到 P_1 和 P_2 的距离。可见,电力做的功决定于始点和终点的位置,而与所经过的路径无关。

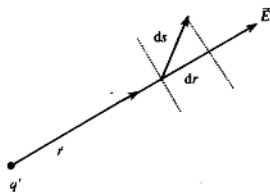


图 1.2 电场中移动电荷做的功

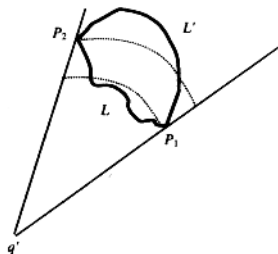


图 1.3 沿回路移动电荷做的功

如果电荷 q 到达 P_2 点以后再沿一任意路径 L' 回到 P_1 点,则整个路程中电力做的功正好相互抵消,即是

$$A = q \int_L \vec{E} \cdot d\vec{s} + q \int_{L'} \vec{E} \cdot d\vec{s} = q \int_{r_1}^{r_2} \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr + q \int_{r_2}^{r_1} \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = 0 \quad (1.13)$$

这就表示任何点电荷在电场中绕一圈,电力做的功等于零。

如果路径 L 是闭合的, 则整个路程做的功等于零。这表明点电荷激发的电场是保守的。因此对于静电场, 具有

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (1.14)$$

即沿任意闭合路线, 场强线积分为零。利用矢量分析有

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_S (\text{rot} \vec{E}) \cdot d\vec{s} = 0 \quad (1.15)$$

也就是

$$\text{rot} \vec{E} = 0 \quad (1.16)$$

这是静电场第一个场微分方程式, 表示静电场的旋度为零, 说明电场是无旋的, 电荷间的作用是直线进行的。

2. 电势的定义

对于电场中电荷在两点间的势能差为

$$u_2 - u_1 = -q \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.17)$$

此式表示在静电场中, 点 2 与点 1 两点之间试探电荷的势能差等于将电荷由 1 点移到点 2 所作的负功。上式中负号表示当电荷移动过程中, 如果电荷作了功, 就减少了电荷具有的势能。显见电荷的势能差与始点和终点以及电量有关。

定义电势差

$$\varphi_2 - \varphi_1 = u_2/q - u_1/q = - \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.18)$$

也就是对于 1、2 两点间的电势差等于自 1 点到 2 点间电场强度的线积分负值, 从物理意义上, 电势差等于将单位试探电荷从 P_1 点移到 P_2 点电力所作的功。

上式规定了两点间电势差值, 没有规定每点上电势的绝对值, 为此可以选取电场中一点 P_0 , 并约定这一点的电势为 φ_0 , 则对于电场中任意一点的电势值为

$$\varphi - \varphi_0 = - \int_{P_0}^P \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.19)$$

如果定义无穷远处的电势 $\varphi_\infty = 0$, 则电场中任一点的电势表示为

$$\varphi = \varphi_\infty - \int_\infty^P \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_\infty^P \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_P^\infty \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.20)$$

上式表示了 P 点的电势等于将单位正电荷自 P 点移到无穷远处电力所做的功。通常选取地球表面的电势为 0。

对于单个电荷 q' , 离它 r 处 P 点的电势为

$$\varphi = \int_P^\infty \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} ds = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.21)$$

如果 q' 是正电荷, 其周围电势 φ 是正的; 若 q' 是负电荷, 则 φ 是负值。

对于 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n , 在 P 点产生的电势为单个点电荷产生的电势的代数和, 即

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i} \quad (1.22)$$

式中 r_i 是 P 点到点电荷之间的距离。

如果 1, 2 两点间相距无穷小的 ds , 则两点的电势差为

$$d\varphi = -\vec{E} \cdot d\vec{s} = -E ds \quad (1.23)$$

即有

$$E_s = -\frac{\partial\varphi}{\partial s} \quad (1.24)$$

式中 $\frac{\partial\varphi}{\partial s}$ 表示 φ 沿 $d\vec{s}$ 方向微商, $\frac{\partial\varphi}{\partial s}$ 等于 φ 的梯度在 $d\vec{s}$ 方向的分量

$$\frac{\partial\varphi}{\partial s} = (\nabla\varphi) \cdot \hat{s} = \text{grad}\varphi \quad (1.25)$$

因此电场 E 与 φ 的关系为

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \quad (1.26)$$

直角坐标中的三个分量为

$$\vec{E}_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}; \quad \vec{E}_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}; \quad \vec{E}_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (1.27)$$

从上式可知, 如果空间电势分布是已知的, 则就可以求得空间各点的电场强度。电场中电势相等的各点的轨迹为等势面。等势面和电力线相垂直。

电势的实用单位为:

$$1\text{V(伏特)} = 1\text{J/C(焦耳/库仑)} = 1/300\text{ 静电单位}.$$

因此相应电场强度单位为: V/m(伏特/米) 。

电偶极子的势: 设有一对间距为 l 的等量异号的电荷 $q_1 = -q, q_2 = +q$, 现讨论离它们很远处的电场, 则这一对点电荷为电偶极子, 电偶极子的电矩写为 $\vec{p} = ql\hat{i}$, 如图 1.4 中, 点 P 离 $-q, +q$ 和 $-q$ 与 $+q$ 连线中点的距离分别为 r_1, r_2, r , 则 P 点的电势为

$$\begin{aligned} \varphi &= -q/4\pi\epsilon_0 r_1 + q/4\pi\epsilon_0 r_2 \\ &= -q/4\pi\epsilon_0 \left[r^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 + rl\cos\theta \right]^{1/2} + q/4\pi\epsilon_0 \left[r^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 - rl\cos\theta \right]^{1/2} \end{aligned}$$

根据 $(1+x)^{-1/2} = 1 - x/2 + 1/2 \cdot 3/4 \cdot x^2 + \dots$, 和 $r \gg l$, 略去二次项, 得

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \left[\frac{l\cos\theta}{r} \right] = \frac{p\cos\theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

由此得电场强度为

$$E_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{2\rho \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

$$E_\theta = -\frac{\partial \varphi}{r \partial \theta} = \frac{\rho \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

用矢量表示为

$$\varphi = \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3}$$

也就是

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\frac{\vec{p}}{r^3} + \frac{3(\vec{p} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5}$$

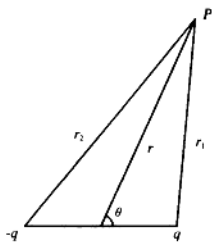


图 1.4 电偶极子产生的电势和电场

§ 1.5 连续分布的电荷产生的电场

上面讨论的是局限于点电荷的情况,引入的电场强度和电势的计算也限于点电荷的情形.实际大气中的积状云、雷雨云等带电体具有一定的大小,电荷分布于物体之中,并且电荷数目之大无法进行具体计算,所以对于这种情形采用积分的方法。

1. 电荷密度的定义

如果带电体内有一点 P , 包围这一点的体积元为 $\Delta\tau$, Δq 是该体元内部的电量, 当 $\Delta\tau$ 足够小时, 比值 $\frac{\Delta q}{\Delta\tau}$ 所趋向的极限就是 P 点的电荷密度 ρ , 写为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta\tau} = \frac{dq}{d\tau} \quad (1.28)$$

2. 体分布的电场强度和电势

当电荷作连续分布时, 可以将物体分割为无限小的体元 $d\tau$, 在体元内包含有的电荷为 $dq = \rho d\tau$, 每一体元可以看做为一点电荷, 则整个电荷分布产生的电场强度及电势用积分方法表示

$$d\vec{E} = \frac{\rho d\tau}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho d\tau}{r^3} \vec{r} \quad (1.29)$$

$$d\varphi = \frac{\rho d\tau}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{r} d\tau \quad (1.30)$$

积分要对整个电荷所在的区域进行, r 是体元 $d\tau$ 到要求的 φ 或 \vec{E} 点距离, 因为 \vec{E} 是矢

量,实际计算应分解为分量来计算:对于点电荷产生的电势及场强分别为 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ 及 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$,故在点电荷处它们都趋向无穷大,成为场的奇点.对于体电荷分布的情形,可以在体电荷以外地方计算,也可以在体电荷内部进行计算,而不会成为无穷大.如对于 P 点的电势和场强,体元 $d\tau$ 以球坐标表示为

$$d\tau = r^2 \sin\theta d\theta d\alpha \quad (1.31)$$

可以看出

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho r^2}{r^3} d\tau \quad \text{及} \quad \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho d\tau}{r} \quad (1.32)$$

都是有限的.

3. 电荷分布于薄层的面电荷的情况

如果荷电层非常薄, $\Delta h \rightarrow 0$,这时可以近似地将电荷看作分布在一面上,定义面电荷密度为单位面积上所有的电量

$$\sigma = \frac{dq}{dS} \quad (1.33)$$

所产生的电势为

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma dS}{r} \quad (1.34)$$

积分对电荷所在的面进行,其中 r 是面元 dS 到要求的电势 φ 处的距离.

4. 电荷的线密度

在闪电过程中,对于线状闪电,电荷集中于一条线上,定义电荷线密度

$$\lambda = \frac{dq}{dl} \quad (1.35)$$

其电势为

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_l \frac{\lambda dl}{q} \quad (1.36)$$

在实际中,最常见的是面电荷的情形,通常物体带电时,电荷往往分布于它的表面,由于强大斥力的存在,单一种电荷分布于空间往往不能处在静止的平衡状态.

§ 1.6 高斯定理和电通量

高斯定理描述的是用电通量表示电场与其源电荷的关系,即是封闭面内部的电通