

高压静电场

解广润 编著

上海科学技术出版社

統一書號 13119·481

定 價 2.45 元

高压静电场

解广瀾 編著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书介绍静电场的各种计算方法(包括直接积分法、镜像法、拉普法、复变函数法、反转法、分离变数法、格林法、网格法、格林倍格法以及近似法)、图解方法、实验方法和调整方法;并具体处理了一些在工程上常常遇到的电场问题,得出技术结论。

本书可作为高等学校电机系及物理系的教学参考用书,特别适宜于高压工程专业的师生和从事高压工程的工作人员参考。

高 压 静 电 场

解 广 润 编 著

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

商务印书馆上海印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 20/32 字数 378,000

1962年11月第1版 1962年11月第1次印刷

印数 1—2,500

统一书号: 13119·481

定 价: (十四) 2.45 元

序

高压靜電場是高电压工程专业的一个重要問題。大家知道，在高电压下絕緣会发生损坏，高压工作者的一个主要任务就是同这种現象作斗争。但是严格說来，并不是高电压的本身，而是作用在絕緣体中的强電場使絕緣损坏的。所以，詳細研究在各种电极情况下電場的分布規律，就成为高压工作者的重要課題了。

本书的一部分內容是根据編者在哈尔滨工业大学讲授“靜電場”一課所用讲稿編写而成的。书中比較全面地介紹了靜電場的理論知識和实验方法，用它們研究了一系列的工程实际問題，并导出技术結論。本书的具体內容如下：

第一章介紹靜電場的基本关系式，最后討論了介质的临界電場强度、電場的不均匀系数和絕緣物的利用系数。

第二章討論在高压工程中常常遇到的一些簡單几何形状电极的電場：同心球极的電場、同軸圓柱間的電場、平行圓柱間的電場、不同心的两球間的電場；并且討論了電場最大值的和电容值的近似計算問題。本章中对于分裂相綫的電場和高压球隙放电器的電場曾作詳細的計算。

第三章討論用拉麦方法計算椭球、橢圓盘、棒形电极、針-板电极、針-針电极、单极旋轉双曲綫面电极以及垂鏈綫旋轉面电极的電場。在本章中对于高压工程中的一个重要問題——接地問題——进行了計算，例如对于半球形接地器、圓盘接地器和管形接地器等等的接地电阻进行了計算，并对管形接地器的“接触电压”和“跨步电压”以及危險区范围进行了分析。在本章中用数学方法論証了針-板電場是最不均匀的電場，因之在高压工程中研究不均匀電場的問題时，可以用針-板電場作为典型。这一章也論及了高压分压器屏蔽圓盘電場的計算方法。在本章的后面对于高压导綫穿

牆洞的結構問題进行了深入的研究,所得結論可用于实际設計。

第四章介紹用保角變換法計算電場的問題,其中除了对某些典型电极形狀的電場作了計算之外,还对以下的工程实际問題进行了研究:例如帶式接地器的接地电阻、局部放电电压和絕緣厚度的关系、計及邊緣效应时平板电容器的电容、标准平板电容器保护环的寬度、高压空气电容器的罗高夫斯基电极、电容器型絕緣結構中的邊緣效应以及树林对架空輸电綫路的屏蔽作用等等。在本章的最后对于有圓弧角的多角形电极的電場的計算作了介紹。

第五章討論了計算電場的反轉法。用这种方法去計算各种相交球电极的電場是很方便的。本章并証明了将电极形狀稍加改变并不影响其电容值。

第六章是用分离变数法解拉普拉斯方程式,引出了在笛卡尔直角坐标中、在圓柱坐标中和在圓球坐标中拉普拉斯方程式的全面解答;并且引出了在旋轉抛物綫面坐标中、在旋轉扁椭圆坐标中和在旋轉长椭圆坐标中拉普拉斯方程式在某些特殊情况下的解答。在本章中探討的实际問題有:高压靜电电压表電場的补偿問題、扇形心綫三心電綫的电容、在均匀電場中导电圓柱体(例如雷云電場中的輸电綫)使電場变形的情况、不完全同心的球形电容器的电容、針式支持絕緣子的電場、簡單套管的電場以及有两种土壤层时的管形接地器的接地电阻等等。

第七章首先介紹格林理論,然后用它論証互換原理和靜電場的单一性,并求出泊松方程式的特解。在本章中还对于几种具体情况下格林函数的推求及其应用作了說明。

第八章是用网格法計算電場,并算出了電綫受到变形后的電場。

第九章討論电介质的极化。計算了变压器油中的水滴、炭粒或气泡使耐压强度下降的問題,山岭使雷云電場变形的問題以及高压空气断路器灭弧室中的電場;并比較了避雷針与避雷綫的電場。本章还介紹了格林倍格关于有各种不同介质时電場的計算方

法。对于介质在电场中受力的问题也给予充分的注意，并论证了纤维在变压器油中会自动在电极间搭成小桥的问题。

第十章说明电场的图解法和各种实验法，其中对于用电解槽进行模拟实验的问题以及用西林电桥测量电容的问题作了详尽的探讨。

第十一章介绍调整电场的各种方法，其中介绍了在以下各种电机和电器中调整电场的方法：保护间隙的奥斯金电极、绝缘子串的保护环、高压阀型避雷器的均压环、支持式绝缘子的内凸电极、瓷套管的法轮盘、高压导线穿墙洞的电极结构、管型避雷器的中间电极、电容器式套管的中間电极、静电电压表的补偿环、电缆的多层介质绝缘以及电机定子高压导线出槽处的半导体漆层等等。

在附录中列出了多种电极的电容公式，它是进行实际设计时得力的参考工具。

从上述本书的内容可以看出，在讨论中不可避免地要牵涉到一些复杂的数学问题。编者注意到读者可能遇到的数学困难，所以本书在叙述上力求深入浅出，讲清物理概念，而在必须用复杂的数学方法时，则力求从最基本的数学概念谈起，这样就能保证具备一般的高等数学知识的读者在学习本书时不会发生太多的困难。

本书的第十章和第十一章是陈慈萱同志协助写出的。教研室的同志们曾对本书提供不少宝贵意见，特志谢意。

如蒙读者赐教，非常欢迎。来信请由上海科学技术出版社转交。

解广润

于上海新园

目 录

序

第一章 靜电場的基本关系式	1
§ 1.1 庫倫定律	1
§ 1.2 电感应强度和 Gauss 定律	7
§ 1.3 电位及电压	12
§ 1.4 电容	18
§ 1.5 部分电容	23
§ 1.6 笛卡尔直角坐标中高斯定律的微分形式	32
§ 1.7 在其他各种坐标系統中的拉普拉斯方程式	34
§ 1.8 临界电場强度	41
习题	43
第二章 几种簡單几何形状电极的电場	44
§ 2.1 同心球极間的电場	44
§ 2.2 同軸圓柱电极間的电場	47
§ 2.3 鏡象法——等位面法	51
§ 2.4 两平行圓柱电极間的电場	58
§ 2.5 分裂相綫的电場	64
§ 2.6 两不同心球之間电場	83
§ 2.7 球隙放电器电場的近似計算	88
§ 2.8 电場最大值的近似計算	93
§ 2.9 电容的近似計算	95
习题	103
第三章 拉麦方法——等位面和特定曲面組相吻合的电場的解法	104
§ 3.1 代表等位面的曲面組所需滿足的条件	104
§ 3.2 曲面組 $\frac{x^2}{a^2+\theta} + \frac{y^2}{b^2+\theta} + \frac{z^2}{c^2+\theta} = 1$ 所代表的等位面	105
§ 3.3 带电椭球导体的电場	108
§ 3.4 带电椭圆盘的电場	110

§ 3.5 带电的椭圆旋轉体及棒形电极的电場	114
§ 3.6 双极旋轉双曲面的电場	123
§ 3.7 单极旋轉双曲面的电場	125
§ 3.8 垂鏈綫旋轉面	130
习题	140
第四章 用保角变换法解靜电場問題	141
§ 4.1 正則复变函数的性质	141
§ 4.2 用 $W = Z^2$ 的函数进行变换	146
§ 4.3 用 $W = Z^{\frac{1}{2}}$ 的函数进行变换	147
§ 4.4 用 $W = \ln Z$ 的函数进行变换	149
§ 4.5 椭圆柱体或双曲綫柱体的电場	152
§ 4.6 綫性变换	158
§ 4.7 利用綫性变换求不同軸圓柱电极間的电場	161
§ 4.8 交角为 α 的两电极間的电場	163
§ 4.9 許瓦茲变换	168
§ 4.10 直角对平板的电場	169
§ 4.11 平板电容器的边缘电場	173
§ 4.12 电容器型絕緣結構中的边缘效应	182
§ 4.13 两个棱角之間的电場	185
§ 4.14 树林对架空輸电綫路的屏蔽作用	188
§ 4.15 有圓弧角的多角形电极的电場	194
习题	200
第五章 用反轉法解靜电場問題	202
§ 5.1 反轉法中的几何关系	203
§ 5.2 反轉前后的电位值的关系	206
§ 5.3 两相切金属球和点电荷之間吸引力	208
§ 5.4 两正交导体球的电場	210
习题	212
第六章 用分离变数法解拉普拉斯方程式	213
§ 6.1 直角坐标系統(笛卡尔坐标系統)中拉普拉斯方程式的解	213
§ 6.2 圓柱坐标系統中拉普拉斯方程式的解	222
§ 6.3 在均匀电場中导电圓柱体使电場变形的情况	231
§ 6.4 在金属圓桶中的电場分布	234
§ 6.5 高压靜电电压表电場的补偿	237

§ 6.6	扇形心綫電纜的電場	241
§ 6.7	圓球坐標系統中拉普拉斯方程的解	249
§ 6.8	兩球球心有一很小距離的球形電容器	258
§ 6.9	兩個帶電的半球殼的電場	261
§ 6.10	針式支持絕緣子的電場	264
§ 6.11	簡單套管的電場	270
§ 6.12	有兩種土壤層時的管形接地電極	275
	習題	280
第七章	格林理論及其應用	281
§ 7.1	格林公式	281
§ 7.2	互換原理	283
§ 7.3	拉普拉斯方程的解式的唯一性	284
§ 7.4	泊松方程的特解	287
§ 7.5	格林函數	290
§ 7.6	“上半空間”的電場問題	292
§ 7.7	球形邊界的電場問題	295
§ 7.8	圓形邊界的電場問題	297
§ 7.9	第二類邊界條件時的格林函數	300
§ 7.10	區域中間部分電場的近似計算	302
	習題	306
第八章	用網格法計算電場	307
§ 8.1	網格法的原理	307
§ 8.2	填出網格各結點上電位的步驟	309
§ 8.3	極坐標時網格的画法	316
§ 8.4	變形電纜的電場	319
	習題	321
第九章	電介質的極化	322
§ 9.1	電介質的極化	322
§ 9.2	電介質存在時的電場計算	326
§ 9.3	介質中的電感應強度	329
§ 9.4	電力綫在介質交界面上的折射	330
§ 9.5	有介質交界面時的鏡象法	334
§ 9.6	均勻電場中的介質球使電場變化的情況	336
§ 9.7	均勻電場中的介質橢圓柱體使電場變化的情況	344

§ 9.8	高压空气断路器灭弧室中的电场	348
§ 9.9	在有各种不同的均匀介质时, 计算电场的方法 (格林倍格法)	361
§ 9.10	在交界面为无穷大平面的两种介质中的电场分布	363
§ 9.11	均匀介质圆柱体(ϵ_2)放在无穷大的另一种介质(ϵ_1)中的电场分布	367
§ 9.12	在均匀介质中有一导体球时电场的分布	371
§ 9.13	在导体平板上有一介质半圆柱体时电场的分布	375
§ 9.14	介质在电场中所受的力	376
§ 9.15	在各向异性介质中电场的计算	384
	习题	389
第十章 电场的图解和实验法		391
§ 10.1	电场的图解法	391
§ 10.2	电场实验法概述	393
§ 10.3	用探针法测量电位	394
§ 10.4	测量绝缘子(或套管)表面上电位分布的方法	396
§ 10.5	测量电力线的方法	398
§ 10.6	电场的模拟实验法	401
§ 10.7	电容的测量	410
	习题	416
第十一章 电场的调整		417
§ 11.1	改变电极形状来调整电场	417
§ 11.2	利用中间电极调整电场	423
§ 11.3	利用外界电场的影响调整原有电场	433
§ 11.4	适当配用不同介电系数的介质来调整电场	433
§ 11.5	利用电阻的电位降影响来调整电场	435
	习题	438
附录 各种电极的电容公式		439
参考文献		458
人名中外文对照表		460
索引		461

第一章 靜電場的基本关系式

§ 1.1 庫倫定律

庫倫用實驗的方法證明,在无穷大的均匀电介质(絕緣体)中,两个靜止的集中电荷(点电荷)之間互相的作用力 F 的大小与两电荷間距离 r 的平方成反比,而与各自的电荷量 Q 和 q 都成正比; F 的方向为沿两电荷間联綫的方向,当两电荷极性相同时为推斥力,当两电荷极性相反时为吸引力。将 F 的值写成数学式子,即成

$$F = \frac{Qq}{kr^2}; \quad (1-1)$$

式中, k 为比例常数,它的值与介质的种类以及 Q 、 q 、 r 和 F 所用的单位有关。在真空中,当 Q 和 q 所用的单位为庫倫, r 的单位为米, F 的单位为牛頓*时,实验証明

$$k = \frac{1}{9 \times 10^9}.$$

为了应用的便利,通常将(1-1)式中的 k 写成

$$k = 4\pi\epsilon = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r;$$

式中, $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ 表示介质的电的性质,叫做电介质的介电系数或介电系数; 4π 称为合理化因子,它的引进可使一系列常用的公式得到较为簡化的样子。 ϵ_0 叫真空的介电系数, ϵ_r 叫介质的相对介电系数。令真空的 $\epsilon_r = 1$, 于是可見

$$\epsilon_0 = \frac{k}{4\pi} = 8.86 \times 10^{-12}.$$

在其他介质中, ϵ_r 不再为 1, 而为其他数值。各种常用介质的 ϵ_r 值見 § 1-8 中的表 1-1。

* 牛頓即千克·米/秒², 1 牛頓等于 10⁵ 达因。

如果將 F 的數值和方向都由數學式加以表達，那末就成為

$$\mathbf{F} = \frac{Qq}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r^3} \mathbf{r}; \quad (1-2)$$

式中， \mathbf{F} 表示作用力的數值和方向； \mathbf{r} 在數值上等於 r ，但它還表示出方向是沿 Q_1 和 Q_2 的聯綫上（沿 r 增大的方向）。上式就叫做庫倫定律。

研究的結果表明，兩個電荷之間的互相作用力並不是一個電荷對另一個電荷超越空間而作用的結果（所謂超距作用），而是一個電荷周圍的電場對另一個電荷作用的結果。拿上述的兩個靜止點電荷 Q 和 q 作為例子： q 所受的力量是電荷 Q 的電場對 q 作用的結果；而 Q 所受的力量則是電荷 q 的電場對 Q 作用的結果。在電荷周圍的介質中是必然要有電場存在的。會使放入其中的試探電荷受到力的作用是電場的一個特性*。如果相對於介質和我們觀察者來說電荷是不動的，同時它的數值也是不變化的，那末其相應的電場將不隨時間而變化。這種電場叫做靜電場。

為了研究點電荷 Q 的電場，我們可以把點電荷 q 作為試探用的電荷。在試探用的點電荷 q 的引入不致使原來的電荷分布情況發生改變的條件下， q 所受的力 \mathbf{F} 對 q 值的比數就叫做 q 所在點的電場強度 \mathbf{E} ，即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}. \quad (1-3)$$

電場強度 \mathbf{E} 是一個向量，單位則顯然是牛頓/庫倫，它的方向和 \mathbf{F} 的方向相同。

在相對於介質和我們觀察者是不動的和不變的點電荷 Q 的情況下，在 Q 周圍的介質中任一點的電場強度 \mathbf{E} 不難由 (1-2) 式求出來

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r^3} \mathbf{r}. \quad (1-4)$$

* 關於電場的其他特性和電場的物質性將在 § 1.4 中討論。

如果点电荷不止一个，而是有很多个(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)，实验证明，这时在某点的总电场强度将等于各个点电荷在该点的电场强度的向量和，也就是说，可以用迭加原理来计算电场强度。用数学式表示，即成

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i; \quad (1-5)$$

式中， r_i 为由所研究的点到电荷 Q_i 之间的距离。电场的这种性质是和 \mathbf{E} 对 Q 的线性关系（即 \mathbf{E} 和 Q 的一次方成正比）分不开的。如果 \mathbf{E} 是和 Q 的其他次方成正比，就显然不可能用迭加原理来计算电场强度了，因为此时将 Q 分成几个较小的部分分别计算再迭加求出的 \mathbf{E} ，和将 Q 一次计算所得的 \mathbf{E} 是不相同的。

对于分布电荷来说，上式可改为积分的形式，即

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \int \frac{dQ}{r^3} \mathbf{r}. \quad (1-6)$$

在一般情况下，为了保证采用的点电荷 q 的引入不会引起原来电荷分布情况的改变，必须令 q 的电荷量极为微小而趋近于零值。因之电场强度的定义也可以叙述为：当采用的点电荷 q 的电量趋近于零时，它在电场中所受的力 \mathbf{F} 与 q 的比值叫做 q 所在点的电场强度 \mathbf{E} ，即

$$\mathbf{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{q}. \quad (1-7)$$

应当指出，即使 $q \rightarrow 0$ ，它引入后也不可避免地会引起原有电场的某些改变，特别在 q 所在点的直接附近更是如此。由于点电荷 q 的半径为零，所以即使电荷量 $q \rightarrow 0$ ，在 q 引入后在 q 点直接附近的总电场强度就将由原来的某值一变而为无穷大。 $q \rightarrow 0$ 只是保证了原来电荷的分布情况不会因 q 的引入而发生变化，也就是在原来电荷的直接附近的电场强度不致发生变化而已。某些书上所说的“微小的试验电荷的携入可不致使原有电场发生改变”是不正确的。

试验电荷 q 在电场中受的力可由(1-3)式求出为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}, \quad (1-8)$$

在应用上式时要注意两点：(1) 上式只是在 q 的引入不会使原来的电荷分布情况发生改变的条件下才是正确的；(2) 上式中的 \mathbf{E} 是在 q 沒有引入以前在該点的电場强度，而不是 q 引入后在該点出現的总的电場强度。

电場的特征可以用电力綫的分布情况来表示。所謂电力綫就是在綫上每一点的切綫方向都与該点电場强度 \mathbf{E} 的方向相同的曲綫。由于在一个点子上的 \mathbf{E} 只有一个方向，所以电力綫是不会互相交叉的。在电場中的每个点子都通过相应的一根电力綫，而在整个电場中可以画出无穷多根电力綫来。例如，一个点电荷的电場的电力綫就是由点电荷向外辐射的无穷多根辐射綫。如果我們在垂直于电力綫的单位截面上只画出等于該截面中心的电場强度值数目的电力綫，那末根据电力綫的疏密，就可决定电場强度值的大小。

为了求出电力綫的方程式，可以从电場中任一点 P 的电場强度 \mathbf{E} 出发。已知

$$\mathbf{E} = i E_x + j E_y + k E_z;$$

式中， i, j, k 各为沿 x, y, z 軸方向的单位向量。假設电力綫在 P 点的一个元段

$$d\mathbf{l} = i dx + j dy + k dz,$$

那末为了使 \mathbf{E} 的方向与 $d\mathbf{l}$ 的方向相一致，显然必須滿足

$$\cos \alpha = \frac{E_x}{|\mathbf{E}|} = \frac{dx}{|d\mathbf{l}|};$$

式中， α 为 \mathbf{E} 与 x 軸的夹角。上式可改写为

$$\frac{E_x}{dx} = \frac{|\mathbf{E}|}{|d\mathbf{l}|}.$$

同理还必須滿足

$$\frac{E_y}{dy} = \frac{|\mathbf{E}|}{|d\mathbf{l}|},$$

$$\frac{E_z}{dz} = \frac{|E|}{|dl|}$$

将上三式合并,可得

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z}, \quad (1-9)$$

即为电力线的微分方程式,經积分即可求出电力线的方程式。

根据定义可知,电力线是从正电荷出发,而终止到负电荷上的,因此在静电场中不可能出现封闭的电力线。

[例 1-1] 在无穷大的平板上有电荷,电荷密度为 σ 。求空间任一点的电场强度及电力线的方程式。

解: 将无穷大的平板认为由半径为 r 宽度为 dr 的很多圆环所组成,并且将坐标的原点取在这些圆环的中心,而令 P 点正好在 z 轴上(参看图 1-1)。

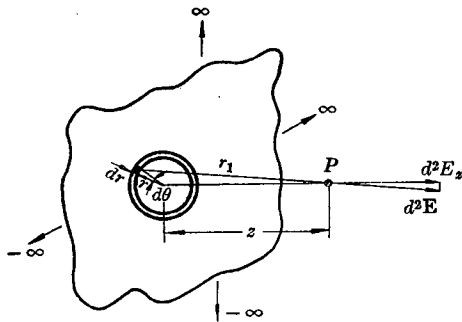


图 1-1 带电的无穷大平板外的电场计算用图

在 $dr \cdot r d\theta$ 元面积上,与元电荷 $dq = \sigma r d\theta dr$ 相应的在 P 点的电场强度为

$$d^2\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{\sigma r dr d\theta}{r_1^3} \mathbf{r}_1.$$

由于对称的关系,同整个圆环中的电荷相应的在 P 点的电场强度显然为 z 方向的,所以为了求整个圆环上的电荷在 P 点的电场强度 dE_z ,可只将 $d^2\mathbf{E}$ 在 z 轴的分量

$$d^2E_z = |d^2\mathbf{E}| \frac{z}{r_1} = |d^2\mathbf{E}| \frac{z}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

对 θ 积分而得,即

$$dE_z = \int d^2E_z = \int_0^{2\pi} \frac{\sigma r dr d\theta}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r (z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sigma r dr}{2 \epsilon_0 \epsilon_r (z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

求整个平板上的电荷在 P 点的电场强度 E_z 时, 可将上式对 r 积分, 即

$$E_z = \int dE_z = \int_0^{\infty} \frac{\sigma r dr}{2\epsilon_0 \epsilon_r (z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1-10)$$

电力线的方程式, 可以从 (1-9) 式求得. 此时 $E_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0 \epsilon_r}$, $E_x = E_y = 0$, 所以 (1-9) 式变成

$$dx = 0, \quad dy = 0;$$

经过积分即得电力线的方程式

$$\left. \begin{aligned} x &= C_1, \\ y &= C_2; \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中, C_1 及 C_2 为任意常数. 此时电力线为平行于 z 轴的任意直线.

[例 1-2] 有一个无穷长的细直线, 每单位长度的电荷为 σ , 求空间任一点的电场强度和电力线的方程式.

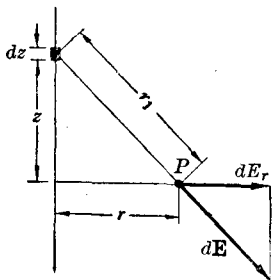


图 1-2 带电的无穷长细直线周围电场的计算用图

解: 参看图 1-2, 元电荷 σdz 在 P 点的电场强度为

$$d\mathbf{E} = \frac{\sigma dz \mathbf{r}_1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r_1^3}.$$

由于对称的关系, 整个线电荷在 P 点的电场强度 \mathbf{E} 将只在 r 方向, 于是只要将上式中的 $d\mathbf{E}$ 在 r 方向的分量 $d\mathbf{E}_r$ 对 z 积分即可求得 \mathbf{E} :

$$d\mathbf{E}_r = |d\mathbf{E}| \frac{r}{r_1},$$

$$\begin{aligned} \therefore E_r &= \int dE_r = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma r dz}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r_1^3} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma r dz}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r (r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sigma}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r r}. \end{aligned}$$

求电力线的方程式时, 可以将 (1-9) 式改为圆柱坐标的形式,

即