

高电压工程

苏联 M. A. 巴比考夫等著

水利电力出版社

高电压工程

苏联 M.A.巴比考夫 H.C.科馬洛夫 A.C.謝尔盖也夫著

解广润 邓伟霖 陈慈萱译

苏联电站部教育司批准作为中等动力学校教科书

水利电力出版社

内 容 提 要

本书包括有以下各章：电场、电介质中的物理过程、高压实验室的设备及在高压下的量测、高压设备的绝缘、地中电流和接地装置、电气设备中的过电压及过电压保护。

本书是中等动力学校的教科书，也可作为从事于高压电气设备的设计、安装和运行工作的技术人员的参考书。

М.А.БАШКОВ Н.С.КОМАРОВ А.С.СЕРГЕЕВ
ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, МОСКВА 1955

高 电 压 工 程

根据苏联国立动力出版社1955年莫斯科修订本第2版翻译

解广润 邓伟霖 陈益黄译

*

1419D403

水利电力出版社出版（北京西郊百万庄二里内）

北京市书刊出版业营业许可登出字第105号

北京市印刷一厂印刷

新华书店科技发行所发行 各埠新华书店经售

*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本·16 $\frac{3}{8}$ 印张·393千字·定价(第9类)1.80元

1959年12月北京第1版

1961年4月北京第3次印刷(9,891—18,908册)

卷 头 語

从这本教科書的第一版出版以来已經过了8年多了。在这一段時間里高电压工程已被許多新的重要的研究和实际的探討所充实。由于必須將它們加以反映,使得作者們將这本教科書的所有各篇無論在內容上或者在叙述的方法上都加以根本的改編。

这本完全改編过的教科書共包括六篇。

头两篇討論有关电气耐压强度的基本問題: 电場, 它的調整方法, 在气体中的放电, 固体及液体电介質的击穿。电場是从闡明电极合理形状的观点, 从絕緣的观点以及从电場調整的可能性的观点来加以探討的。在探討气体中的放电及固体和液体电介質的击穿时特別着重在这些現象的物理过程方面。

第三篇对于能够产生所有形式的高电压(工頻电压, 直流, 冲击和微弱衰減的电压等)的设备加以描述。在这一篇的末尾还探討了各种在高电压下的現代測量仪器的方法: 静电电压表, 电子射线示波器等。

第四篇叙述了高压絕緣和絕緣結構的主要形式, 以及絕緣的預防試驗問題。这一篇和本書的前一版比較起来是大大地扩充了。

第五篇談的是接地和接地裝置。

第六篇討論了过电压及电气设备的过电压保护。这一篇中分析的結論用典型的习題加以补充。

本書的第一和第二篇以及第10章是由A.C.謝尔盖也夫(Сергеев)写成的; 第三, 第四和第五篇是M.A.巴比考夫(Бабиков)写成的, 第六篇是H.C.科馬洛夫(Комаров)写成的。

这本教科書的所有各章都由A.H.道尔金諾夫(Долгиков)校閱。作者們对于他在校閱本書中的巨大劳动表示深深的感謝。

作者們对于Д.В.拉塞維格(Разевиг)所提出的宝贵意見非常感激。

作者們对于讀者帮助改进本書的所有意見將都很感謝。意見請按下列地址寄下:

Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., Д.10. Госэнергоиздат.

作 者

目 录

緒 論

第一篇 电 場

第一章 电場的特性及其理論的和实验的

- 确定法..... 6
- 1-1. 基本概念和定义..... 6
- 1-2. 边缘效应..... 10
- 1-3. 平行电軸的电場..... 11
- 1-4. 单相架空綫..... 14

- 1-5. 三相架空綫..... 16
- 1-6. 球間隙的电場..... 18

第二章 研究电場的图解法和实验法..... 19

- 2-1. 用图解法檢查和描繪电場..... 19
- 2-2. 研究电場的实验方法..... 20
- 2-3. 电場的調整.....

第二篇 电介質中的物理过程

第三章 气体电介質..... 24

- 3-1. 一般概念..... 24
- 3-2. 气体質点的激发, 游离, 扩散和重合..... 24
- 3-3. 游离的种类..... 26
- 3-4. 电子所引起的碰撞游离的系数..... 29
- 3-5. 雪崩式的放电..... 32
- 3-6. 斯多列多夫的現象和常数..... 33
- 3-7. 由于正离子的作用而使游离加强..... 34
- 3-8. 起始放电电压和压力的关系..... 35
- 3-9. 气体的耐压和頻率的关系..... 38
- 3-10. 耐压强度高的气体..... 38
- 3-11. 空間电荷所引起的电場畸变。辉光放电..... 39
- 3-12. 不均匀电場中的放电..... 40
- 3-13. 不对称电場中放电的进行情况..... 44

- 3-14. 障壁(极間障)对間隙耐压强度的影响..... 46
- 3-15. 在輸电綫路的导綫上的电晕..... 47
- 3-16. 冲击时的放电..... 51
- 3-17. 閃电形式的放电..... 57
- 3-18. 表面放电..... 60
- 3-19. 电弧放电..... 63
- 3-20. 輸电綫路上的开放性电弧..... 67

第四章 液体的和固体的介質..... 68

- 4-1. 液体的和固体的介質的电导系数..... 68
- 4-2. 介質的极化..... 70
- 4-3. 介質的损失和絕緣的电容..... 72
- 4-4. 介質损失的測量..... 75
- 4-5. 固体电介質的击穿..... 76
- 4-6. 液体电介質的击穿..... 79

第三篇 高压实验室的设备及在高压下的量測

概論

第五章 工頻及高频的高压設備..... 82

- 5-1. 工頻高压試驗設備..... 82
- 5-2. 高频高压設備..... 87
- 5-3. 大容量的高压試驗設備..... 92

第六章 高压直流試驗設備和带电質点加

速器..... 95

- 6-1. 概論..... 95
- 6-2. 电子整流設備..... 96
- 6-3. 高压靜电发电机..... 100
- 6-4. 具有机械整流器的直流高压設備..... 101
- 6-5. 关于带电質点加速器的一般知識..... 102

第七章 高电压及大电流的冲击发生器.....103

- 7-1. 概論.....103
- 7-2. 冲击电压发生器.....104
- 7-3. 冲击电流发生器.....108
- 7-4. 联合的冲击发生器.....109

第八章 在高电压时的量测.....110

- 8-1. 概論.....110

- 8-2. 高压静电电压表.....110

- 8-3. 球形火花放电器.....113

- 8-4. 电子示波器.....116

- 8-5. 重复性过渡过程分析仪.....121

- 8-6. 分压器.....122

- 8-7. 电花仪.....123

- 8-8. 雷电电流的鉄磁记录器.....124

第四篇 高压设备的絕緣

第九章 高压设备絕緣概論.....126

- 9-1. 高压设备的定义及用途.....126
- 9-2. 高压设备絕緣分类.....126
- 9-3. 高压絕緣水平.....128

第十章 高压絕緣子.....129

- 10-1. 概論.....129
- 10-2. 綫路絕緣子.....130
- 10-3. 悬式絕緣子綫, 綫上的电压分布
和保护用金具.....132
- 10-4. 在严重脏污条件下工作的絕緣
子.....133
- 10-5. 在綫路上决定已损坏絕緣子的
方法.....134
- 10-6. 电站-电器絕緣子.....136
- 10-7. 絕緣子的电气和机械特性.....146
- 10-8. 絕緣子的試驗.....150

第十一章 高压架空綫电綫和电綫輸电綫的

电气絕緣.....150

- 11-1. 概論.....150
- 11-2. 高压架空綫电綫的絕緣.....151
- 11-3. 高压电綫綫路(网络)的絕緣.....153
- 11-4. 电綫的检查試驗.....163

第十二章 电机絕緣和高压电力变压器的

絕緣.....165

- 12-1. 概論.....165

- 12-2. 旋轉电机絕緣的基本特性.....165

- 12-3. 电压35千伏及以上的发电机的
定子繞組的絕緣.....169

- 12-4. 定子繞組絕緣的抗电强度.....170

- 12-5. 电机絕緣的检查試驗.....171

- 12-6. 电力变压器絕緣的基本特性.....174

- 12-7. 变压器絕緣的选择和計算要点.....175

- 12-8. 变压器絕緣的检查試驗.....178

第十三章 高压设备絕緣的預防試驗.....180

- 13-1. 概論.....180

- 13-2. 用交流工頻高压作絕緣試驗.....181

- 13-3. 用直流高压作絕緣試驗.....182

- 13-4. 用直流測量絕緣电阻及貫穿电导
电流(漏泄电流).....182

- 13-5. 介質損耗的量測.....183

- 13-6. 电容的量測.....185

- 13-7. 絕緣中部分放电的量測.....186

- 13-8. 电压分布的量測.....188

- 13-9. 用倫琴射綫檢查絕緣的方法.....188

- 13-10. 超声波法.....188

- 13-11. 絕緣中电流的高次諧波和有效
分量的分离和波形摄影.....139

- 13-12. 流动試驗設備(流动實驗室).....189

第五篇 地中电流和接地裝置

概論

情况.....200

第十四章 工頻电流从接地器流散的情况.....191

- 14-1. 当电流流入地中时产生的現象.....191
- 14-2. 土壤(大地)的导电性質.....195
- 14-3. 接地器和它們的电气特性.....196

- 15-1. 在大冲击电流从接地器流散时所
产生的現象.....200

- 15-2. 接地器的基本型式及其冲击电阻
的計算.....202

第十五章 大冲击电流从接地器流散的

第六篇 电气设备中的过电压及过电压保护

概論

第十六章 在綫路上以及在回路中的波的

过程.....	206
16-1. 电磁波沿着导綫的传播情况.....	206
16-2. 波的反射和折射.....	208
16-3. 波的过程中的等值回路.....	209
16-4. 为了决定反射系数和折射系数而应用等值回路的例子.....	210
16-5. 斜角波袭到装有避雷器的变电所上.....	211
16-6. 波穿过电感或从电容旁边流过.....	213
16-7. 波袭到振荡回路上.....	216
16-8. 波在双导綫和多导綫的系统中的运动情况.....	217
16-9. 多次反射.....	219
16-10. 波沿导綫流动时的衰减和变形.....	221
第十七章 在变压器的和电机的綫組中的波.....	222
17-1. 概論.....	222
17-2. 当直角波袭来时电压沿变压器綫組的分布情况.....	222
17-3. 非周期性的和周期性的衰减波袭到变压器上的情况.....	225
17-4. 非共振变压器.....	227
17-5. 在三相变压器中电压的分布情况.....	229
17-6. 电压从一个綫組过渡到另一个綫組.....	230
17-7. 在旋轉电机綫組中波的傳播情况.....	231
第十八章 大气过电压.....	232
18-1. 大气过电压.....	232
18-2. 雷电的电气参数.....	233

18-3. 避雷装置及其保护作用.....	234
18-4. 感应过电压.....	238
18-5. 直击雷的过电压.....	239
18-6. 建議用来保护輸电綫路的各种措施.....	241
第十九章 操作过电压.....	242
概論.....	242
19-1. 电弧重复点燃时的綫路拉閘.....	243
19-2. 无載变压器的拉閘.....	243
19-3. 繞綫轉子的异步电动机的拉閘.....	244
19-4. 共振过电压.....	244
19-5. 当一相对地短路时在中性点絕緣的系统中的过电压.....	247
19-6. 对地短路电流值的决定.....	248
19-7. 由于間歇性的对地短路所引起的过电压.....	250
19-8. 灭弧设备及其接入綫路图.....	252
第二十章 避雷器.....	255
20-1. 概論.....	255
20-2. 保护火花間隙.....	255
20-3. 管型避雷器.....	256
20-4. 閘型避雷器.....	258
20-5. 保护内部过电压的避雷器(电压限制器).....	261
第二十一章 发电厂和变电所的絕緣的保护.....	263
21-1. 发电厂和变电所对直击雷进行保护.....	263
21-2. 变电所絕緣对从綫路袭来的波进行保护.....	264
21-3. 旋轉电机的保护.....	266

緒 論

“高电压工程”一課既从定性方面也从定量方面来研究在高电压下的电场，在电介质中的放电和击穿，电气絕緣和絕緣結構，在电气设备中的过电压，以及与高压实验室的设备，高压測量，絕緣及絕緣結構的預防試驗方法，接地和电气设备的过电压保护等方面有关的問題。

这些問題中的每一个都有着其特点和独立的意义。但是所有它們的目的都在于要解决高电压工程的基本問題——創制和保証高压设备的可靠工作的电气絕緣。例如，气体中的放电有着很大的独立意义，但是在高电压工程中它們是从絕緣性質的观点来加以考虑的，因为气体特别是空气在所有絕緣結構中都存在着。

高电压工程是和第一台高压设备的出現同时产生的，因为这时电气絕緣已經决定了它們的工作的可靠性。随着設備額定电压的增长，对絕緣的要求也增大了。在很大的程

度上这些要求是由在雷电放电时（大气过电压）和操作时（操作过电压）在电气设备的各部分所产生的过渡过程来决定的。由于要解决高电压工程中的問題，就需要有能够产生各种形式和形状的高电压的特殊的高压实验室以及高压測量仪器。在高电压工程一課中，也要研究这种实验室的基本设备。

由于我們在苏联建設 400 千伏的古比雪夫——莫斯科，斯大林格勒——莫斯科等远距离輸电工程，一些新的問題已在高电压工程的面前提出了。这些問題包括絕緣的問題，內部过电压的問題，电量的問題以及其它問題。目前还正在解决有关高压直流輸电的一些技術問題。

首先在我們苏联出現的第一批和平利用原子能的設備在高电压工程的面前提出了一系列与創制新的超高压电源有关的重要問題。这一新技术的某些問題在本書中已有所反映。

第一篇 电 場

第一章 电場的特性及其理論的和实验的确定法

1-1. 基本概念和定义

作用在位于电場中某一点的单位正电荷上的力称为該点的电場强度 E 。在电場中的任一点其方向都和向量 E 的方向相符合的綫称为电場的电力綫。

按結構來說，电場分为均匀的和不均匀的，对称的和不对称的。在均匀的电場中，任意点的电場强度都相等。在对称的电場中，两电极附近的电場是相同的。

也可用电位 φ 来表示电場的特性，电場的每一点都有电位。在这种情况下，电位是由单位点电荷在电場該点时所將貯有的位能来决定的。这个能量相当于单位电荷从該点移至无穷远处所需化費的功，而在无穷远处电場的电位認為等于零。实际上在大多数的場合下認為地是零电位的。

在电場中，各点具有同一电位的面称为等位面。在电場的任一点上，电場强度的向量垂直于等位面。

通常，用电力綫和等位面的形式来表示电場。在单位面积上通过的电力綫愈多，則电場愈强；因此电場强度的大小也可以按电力綫的密度来决定。

在数学上向量 E 和无向量 φ 間的关系写成：

$$E = -\frac{d\varphi}{dx}, \quad (1-1)$$

其中 $\frac{d\varphi}{dx}$ —— 电位沿电力綫的第一次微分。負号表示电場作用在电位减少的方向。

因为电位用伏或千伏来度量，而距离用厘米来度量；所以度量电場强度 E 的大小的

单位規定为伏/厘米或千伏/厘米。

在均匀电場中 $E = U/x$ ，其中 U —— 电位差，而 x —— 电場中所研究的点与点間的距离。

在描述电場时，有时利用和电場强度的大小相反的值：

$$g = -E = -\frac{d\varphi}{dx} \quad (1-2)$$

这个值称为电場的电位梯度。电場的电位梯度是向量，它的数值决定了沿电力綫方向电位增加的速度。

应该注意，和几个电荷有关的复杂的电場，用求电位的方法，而不是用直接求电場强度的方法来研究是比较简单的。在第一种情况下，电場各点的电位是用各个电荷电場的电位的代数和的方法求得的；而在第二种情况下則不得不將各个电場强度几何相加起来。

在对电場的关系上，所有的物質可分成两个基本类别：导体和电介質（絕緣物質）。在电介質中（空气，其他气体，油，瓷），由外部电荷所造成的电場可以长期存在；而在导体内部电場实际上在一瞬間就要消失掉。

从物理課中大家知道，点电荷 Q 的电場强度为：

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon S} = \frac{Q}{\epsilon_0 4\pi r^2} \quad (1-3)$$

其中 ϵ —— 介質的相对介質常数；

ϵ_0 —— 真空的（实际上是空气的）绝对介質常数：

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 10^9} = 8.86 \times 10^{-12} \text{ 法/厘米；}$$

$S = 4\pi r^2$ —— 离开电荷的距离为 r 的等位球

面的面积。

因为真空的（实际上是空气的） ϵ 等于1，而任何其他电介质中 ϵ 都大于1；则根据(1-3)式，当 $Q=\text{const}$ 时在空气中的电场强度 E 将为在电介质中的 ϵ 倍。在两个串联的电介质中， ϵ 之值较大的电介质中 E 较小。

电介质中电场减弱的原因是极化现象。在电场的作用下，电介质中原子和分子的束缚电荷发生位移：正的沿电场方向移动，而负的向相反方向移动。在电场中电介质的原子和分子变成了偶极子，即极化的质点。偶极子的电场和主电场相反，因此就削弱了主电场。但是电介质中的电场并不是减少到零值，而是到某一有限的数值。

我们想象把点电荷 Q 放在位于煤油（ $\epsilon_2=2$ ）中的空气泡（ $\epsilon_1=1$ ）的中心。在这种情形下电场图如图1-1所示。在空气和煤油的交界处，按下面的规律有一部分电力线中断了：

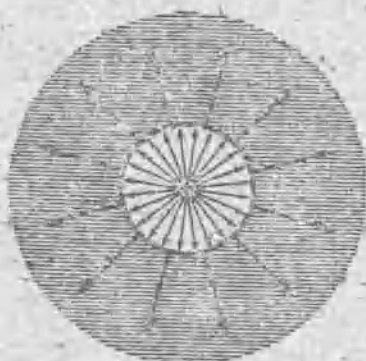


图1-1 电荷放在位于煤油中的空气泡的中心。在煤油和空气的交界面上部分电力线中断了

$$E_1 \epsilon_1 = E_2 \epsilon_2. \quad (1-4)$$

我们时常用电位移向量来代替电场强度向量 E 。

$$D = \epsilon_0 \epsilon E [\text{库/厘米}^2], \quad (1-5)$$

电位移向量和电场强度向量的区别在于乘数 $\epsilon_0 \epsilon$ 。 D 值用每平方厘米的库仑数来表示，如果将面积为一平方厘米的金属片在电场内

所研究之处和电力线相垂直而置放，那么在上面电荷 Q 就在数量上和 D 相等。在电极附近这个值等于电极上的电荷密度 σ 。

如(1-4)和(1-5)式所示，在从一种介质（ ϵ_1 ）过渡到另一种介质（ ϵ_2 ）时电位移向量保持不变。如果作电场图时，所采取的线条不是和电场强度成正比而是和电位移成正比，则电场就可由连续的线条表示出。

如果用封闭面将电荷包围起来，那末穿过这一面的电位移通量 N 在数值上将等于电荷 Q ；例如，对半径为 r 的球表面来说

$$N = DS = \epsilon_0 \epsilon ES = \epsilon_0 \epsilon \frac{Q}{S_0 4\pi r^2} \times 4\pi r^2 = Q. \quad (1-6)$$

如果两个具有不同介质常数的介质的交界面并非等位面，那末电场的电力线就要发生折射（图1-2, a）。在图上第一层中用较黑的线条画出一根电力线，并且就把它当作电场强度的向量 E_{11} 。将这向量分成两个分量：与分界面正交的分量 E_{11n} 和相切的分量 E_{11t} 。在第二层介质中电场强度的切线分量在数量上和方向上都保持不变，即 $E_{12t} = E_{11t}$ 。

因为在相邻两点1和2（图1-2, b）间的电位差

$$U_{12} = E_{11} S = E_{12} S,$$

故消去 S 就得到： $E_{11} = E_{12}$ ，即在分界面上电场强度的切线分量保持不变。在第二层中电场强度的正交分量改变了 ϵ_1/ϵ_2 倍，于是 $E_{12n} = E_{11n} \epsilon_1/\epsilon_2$ 。在第二层中，电场强度在数量上和方向上都由分量 E_{12n} 和 E_{12t} 所

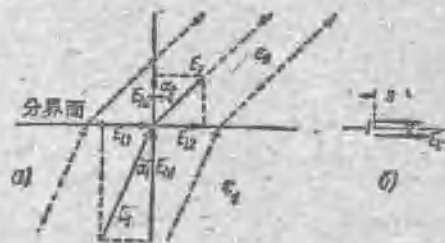


图1-2 电力线的折射

① “电荷”二字原文为“电荷密度”，今改为此。

构成的平行四边形的对角线来决定。

从图中见到，在第二层中电场强度离开法线的角度较第一层中的为大。当然对电力线来说也是如此。偏斜度的增加是由于正交分量的减少产生的，而正交分量的减少是由第二层中极化的增加所引起的，因为 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 。

对第一层及第二层来说，我们从图中得到

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{E_{11}}{E_{h1}}, \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{E_{12}}{E_{h2}},$$

或

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{11}}{E_{h1}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (1-7)$$

在实际中常常利用由电介质隔开的两个导体所组成的系统。这样的系统称为电容器，而被电介质隔开的导体称为电容器的电极。通常电容器两电极的电荷和电位在数值上相等而符号相反。电极上的电荷用 $+Q$ 和 $-Q$ 来表示，电位对应地用 $+\varphi$ 和 $-\varphi$ 来表示，电位差 $+\varphi - (-\varphi) = 2\varphi$ 用 U 来表示。电容器上的电位差（电压）愈大，则其电极上的电荷也就愈多。电极上的电荷值和电容器上电压之比用 C 来表示，并且称之为电容器的电容：

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1-8)$$

表 1-1 中列出最常用的电极的简图以及可以用来决定电容器的最大电场强度和电容的公式。

如果平板电容器或圆柱电容器中的分层绝缘由两层以上组成时，那末最大电场强度和电容由下列公式决定：

1) 对于平板电容器

$$E_x = \frac{U}{a_x} \times \frac{1}{\frac{C_x}{C_1} + \frac{C_x}{C_2} + \dots}; \quad (1-9)$$

$$C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_x S}{a_x};$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots} \quad (1-10)$$

2) 对圆柱电容器

$$E_x = \frac{U}{r_2 \ln \frac{r_{x+1}}{r_x}} \times \frac{1}{\frac{C_x}{C_1} + \frac{C_x}{C_2} + \dots}; \quad (1-11)$$

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_x l}{\ln \frac{r_{x+1}}{r_x}};$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots} \quad (1-12)$$

电场愈均匀则电介质的利用愈好。电介质的利用系数由所研究的结构中的最小电场强度和最大电场强度的比值来决定。例如，在同心圆柱中这个利用系数由内部圆柱上的电场强度和外部圆柱上电场强度的比值来决定。

应该注意，在分层绝缘的电容器中，在介电常数和层的厚度的关系不恰当时，其中某一层中的电场强度可能超过它的耐压强度，这一层将要击穿，此时所有的电压都加到其余的层上，于是这些层中的电场强度就增加了。

电介质的击穿是指它丧失绝缘性质的过程。经过击穿处将流过由外部电源容量决定的非常大的电流。

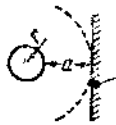
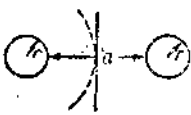
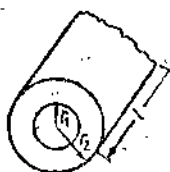
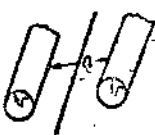
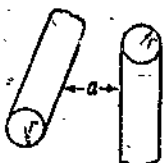
电介质开始击穿的电场强度的极限值 E_{np} 决定了电介质的耐压强度，而击穿电场强度 E_{np} 与在工作电压下的电场强度 E 的比值决定了安全系数。

在分层绝缘的圆柱电容器中为了得到较均匀的电场，必须把介电常数较大的那些层放在离内部电极较近的地方。在这种情况下绝缘的利用将要好一些。

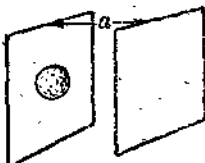
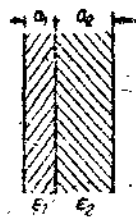
平板形电容器式的分层绝缘在发电机的槽中可以见到。圆柱形的分层绝缘在高压套管和电缆中可以见到。

表1-1

最简单的电极间的最大电场强度及电容

电 极	草 图	最大电场强度	电 容	例
平 板		$E = U/a$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{a}$	$U = 30$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $\epsilon = 1$; $S = 1$ 厘米 ² ; $E = \frac{30}{3} = 10$ 千伏/厘米 $C = \frac{8.86 \times 10^{-14}}{3} = 2.95 \times 10^{-14}$ 法
同心球		$E = \frac{U}{a} \times \frac{r_2}{r_1}$	$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon \frac{r_1 r_2}{a}$	$U = 30$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $r_1 = 3$ 厘米; $\epsilon = 1$; $E = \frac{30}{3} \times \frac{6}{3} = 20$ 千伏/厘米; $C = \frac{1}{9 \times 10^9} \times \frac{6 \times 3}{3} = 0.67 \times 10^{-11}$ 法
球对平板		$E = \frac{U}{a} \times \frac{r+a}{r} \times \frac{9}{10}$	$C = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon a}{f-1}$	$U = 30$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $r = 3$ 厘米; $\epsilon = 1$; $E = \frac{30}{3} \times \frac{3+3}{3} \times \frac{9}{10} = 18$ 千伏/厘米; $C = \frac{3 \times 10^{-11}}{(1.78-1)9} = 0.43 \times 10^{-11}$ 法; f —电场不均匀系数(见表1-2)
两个球		$E = \frac{U}{a} \times \frac{r + \frac{1}{2}a}{r} \times \frac{9}{10}$	$C = \frac{\pi\epsilon_0 \epsilon a}{f-1}$	$U = 30$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $r = 3$ 厘米; $\epsilon = 1$; $E = \frac{30}{3} \times \frac{3 + \frac{1}{2} \times 3}{3} \times \frac{9}{10} = 13.5$ 千伏/厘米; $C = \frac{3 \times 10^{-11}}{(1.366-1)4 \times 9} = 0.23 \times 10^{-11}$ 法
同轴圆柱		$E = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$	$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$	$U = 30$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $r_1 = 3$ 厘米; $r_2 = 6$ 厘米; $\epsilon = 1$; $l = 1$ 厘米; $E = \frac{30}{2.3 \times 3 \lg \frac{6}{3}} = 14.5$ 千伏/厘米; $C = \frac{1}{2 \times 2.3 \times 9 \times 10^{11} \lg \frac{6}{3}} = 0.08 \times 10^{-11}$ 法
圆柱对 平 板		$E = \frac{U}{r \ln \frac{r+a}{r}} \times \frac{9}{10}$	—	$U = 30$ 千伏; $r = 3$ 厘米; $a = 3$ 厘米; $E = \frac{30}{3 \times 2.3 \lg \frac{6}{3}} \times \frac{9}{10} = 13$ 千伏/厘米
两个平 行圆柱		$E = \frac{\frac{U}{2}}{r \ln \frac{r+a}{r}} \times \frac{9}{10}$	—	$U = 30$ 千伏; $r = 3$ 厘米; $a = 3$ 厘米; $E = \frac{15}{3 \times 2.3 \lg \frac{4.5}{3}} \times \frac{9}{10} = 11.25$ 千伏/厘米
轴线相互 垂直的 两圆柱		$E = \frac{\frac{U}{2}}{r \ln \frac{r+a}{r}} \times \frac{9}{10}$	—	$U = 30$ 千伏; $r = 3$ 厘米; $a = 3$ 厘米; $E = \frac{15}{3 \times 2.3 \lg \frac{4.5}{3}} \times \frac{9}{10} = 11.25$ 千伏/厘米

續表

电 极	草 图	最大电场强度	电 容	例
平板上的半球对平板		$E = \frac{3U}{a}$ $r_{球} \ll a$	—	$U = 30$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $E = \frac{3 \times 30}{3} = 30$ 千伏/厘米
平板上的半圆柱对平板		$E = \frac{2U}{a}$ $r_{柱} \ll a$	—	$U = 20$ 千伏; $a = 3$ 厘米; $E = \frac{2 \times 30}{3} = 20$ 千伏/厘米
平板间的层绝缘		$E_1 = \frac{U}{a_1} \times \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}}$ $E_2 = \frac{U}{a_2} \times \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}}$	$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{a_1}$ $C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{a_2}$ $C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$U = 30$ 千伏; $a_1 = 1$ 厘米; $a_2 = 2$ 厘米; $\epsilon_1 = 1$; $\epsilon_2 = 2$; $S = 1$ 厘米 ² $C_1 = \frac{8.86 \times 10^{-14} \times 1}{1} = 8.86 \times 10^{-14}$ 法; $C_2 = 8.86 \times 10^{-14}$ 法; $C = 4.43 \times 10^{-14}$ 法; $E_1 = 15$ 千伏/厘米; $E_2 = 7.5$ 千伏/厘米
圆柱间的层绝缘		$E_1 = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \times \frac{C_2}{C_1 + C_2}$ $E_2 = \frac{U}{r_2 \ln \frac{r_3}{r_2}} \times \frac{C_1}{C_1 + C_2}$	$C_1 = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_1 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$ $C_2 = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_2 l}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$ $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$U = 30$ 千伏; $r_1 = 3$ 厘米; $r_2 = 4$ 厘米; $r_3 = 6$ 厘米; $l = 1$ 厘米; $\epsilon_1 = 2$; $\epsilon_2 = 4$; $C_1 = \frac{2\pi \times 2 \times 1}{4\pi \times 9 \times 10^{11} \times 2.3 \lg \frac{4}{3}} = 0.39 \times 10^{-11}$ 法; $C_2 = 0.55 \times 10^{-11}$ 法; $C = 0.228 \times 10^{-11}$ 法; $E_1 = 20.5$ 千伏/厘米; $E_2 = 7.7$ 千伏/厘米

1-2. 边缘效应

在电场中的金属零件边缘上电力线变得稠密的效应就叫做边缘效应。在高压电器中,应力求除去边缘效应,因为它能够引起沿电介質(绝缘子)表面的不希望的放电,引起额外损失以及测量结果的不准等等。

在图1-3中画出了尖边缘电极平板电容器底电场图。在板间中部电场是均匀的,在边缘附近电场不均匀并且电力线具有很大的密度。

消除边缘效应的方法之一是将尖边缘弯成圆形。如果平板电容器的两个平行圆盘的

电极按照等位面 $U_x = \pm U/2$ 做成,那么在平板间中部的电场强度将要比边缘的大。

通常电极按照等位面 $U_x = \pm U/2$ 做成,并且将电极延伸到等位面和 y 轴平行的地方,

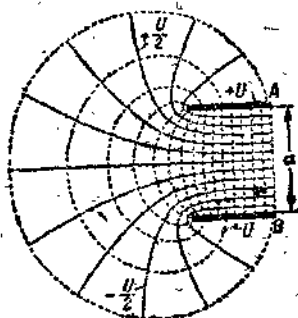


图1-3 尖边缘电极的平板电容器底电场图(等位线——实线,电力线——虚线)。

在这里将它们弯成为圆形(图1-4)。按照 U_a 小于 $U/2$ 的等位面制造电极是不合适的。因为这样电容器的尺寸就要增大。

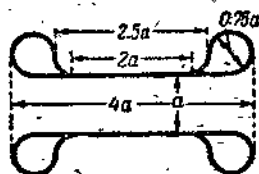


图1-4 边缘弯圆的圆盘电极的断面图

我们再来谈一种消除边缘效应的方法。在高压实验室内，在各种测量中应用到圆柱电容器，电容器的外部圆柱的边缘按等位面 $U_s = \pm U/2$ 弯圆，而内部圆柱分成三部分，同时用固体电介质将边上的两部分和中间部分分开并将边上两部分接地(图1-5)。在外部圆柱上加上高电位，而从内部圆柱的中间部分引出导线接到测量仪器上。这样的装置可以在长度 l 上得到沿圆柱形等位面电场强度相同的电场。在这部分中，电场强度及电容按圆柱电容器的公式来计算。这种装置的电容器常常在高压测量电桥中作为标准电容器应用。

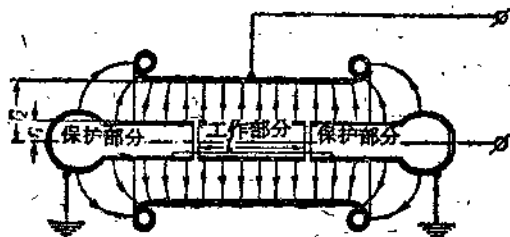


图1-5 中部电场被屏蔽的圆柱电容器

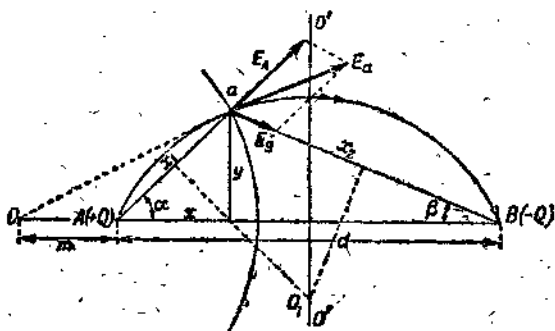


图1-6 经过电轴A和B间的电场任意点a的等位线及电力线的作图法

1-3. 平行电轴的电场

电轴就是半径为无穷小的带电导体。在图1-6中画出了在单位长度(1厘米)上的电荷为 $+Q$ 和 $-Q$ 的两个平行电轴A和B的痕迹。轴间的距离用 d 表示。我们应用迭加法分别地计算电轴A和B的电场来求得任一点a的电场强度及电位。带电的轴的电场和圆柱电容器的电场相似，因此由A轴电荷在被研究的a点所生的电场强度为

$$E_A = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi x_1};$$

由B轴电荷所生的为

$$E_B = \frac{-Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi x_2}.$$

总的电场强度 E_a 由 E_A 和 E_B 两个分量的几何和来决定:

$$E_a = \sqrt{E_A^2 + E_B^2 + 2E_A E_B \cos(\alpha + \beta)}. \quad (1-13)$$

在a点的电位由A轴和B轴在该点所生的电位 U_A 和 U_B 的代数和来决定:

$$U_A = - \int E_A dx_1 = - \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi} \ln x_1 + k_1;$$

$$U_B = - \int E_B dx_2 = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi} \ln x_2 + k_2.$$

最后,

$$U_a = U_A + U_B = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi} \ln \frac{x_2}{x_1} + k \quad (1-14)$$

最后的一个式子决定了电场中任一点的电位，从而也决定了零电位面上的电位，因为在此情况下电场是对称的，所以零电位面穿过A和B轴的中点，垂直于AB线。对这个中性面 OO' 的任一点来说

$$x_1 = x_2.$$

因此，从上面的方程式中就可求出积分常数 $k=0$ 。因此a点电位的最后公式是

$$U_a = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi} \ln \frac{x_2}{x_1} = \alpha Q \quad (1-15)$$

乘数 $\alpha = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi} \ln x_2/x_1$ 叫做电位系数。

到 A 軸和 B 軸距离之比都相等(即 $\frac{x_2}{x_1} = k = \text{const}$) 的相邻点的总和就是等位面, 从公式(1-15)可以看出此点。在图 1-6 中将 A 点作为直角坐标的原点。横軸放在 AB 綫上。 a 点現在的坐标用 x 和 y 来代表。将 x_2 和 x_1 用現在的坐标来表示就得到:

$$(d-x)^2 + y^2 = k^2(x^2 + y^2),$$

或

$$x^2 + y^2 + \frac{2d}{k^2-1}x - \frac{d^2}{k^2-1} = 0.$$

加一个和减一个 $\frac{d^2}{k^2-1}$, 得到:

$$\left(x + \frac{d}{k^2-1}\right)^2 + y^2 = \frac{d^2}{(k^2-1)^2} + \frac{d^2}{k^2-1}.$$

所得到的式子是中心在横軸上面的圆的方程式。中心位于距原点

$$m = -\frac{d}{k^2-1} \quad (1-16)$$

处。圆的半径为

$$r = \sqrt{\frac{d^2}{(k^2-1)^2} + \frac{d^2}{k^2-1}} \quad (1-17)$$

改变 k 值, 我們得到了圓族(图 1-7), 这些圓是垂直于 A 軸和 B 軸的平面上的等位面的轨迹。这些等位面本身是一些不和 A 軸及 B 軸同軸的圓柱面。

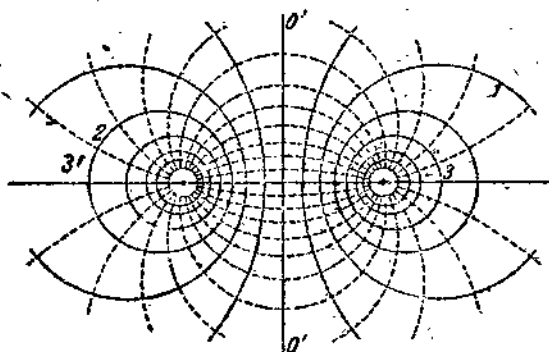


图 1-7 平行电軸的电場

可以用下列方法画出經過电場某一点的等位圓。将 a 点(图 1-6)和电軸 A 和 B 相連, 然后求出 $\frac{x_2}{x_1} = k$ 之值及等位圓的中心的横坐标

$$m = -\frac{d}{k^2-1}.$$

用由 a 点到所得中心点的連綫作为半径画圓来, 这就是所求的經過該点的等位圓。

因为电力綫和等位綫成直角相交, 而在电軸 A 和 B 的电場内等位綫是圓形的, 那末自然在这种电場中电力綫也是圓形的。

为了画出經過电場任一点 a 的电力綫, 需要将 a 点和电軸 A 或 B 相連接, 从 aA 或 aB 綫的中心垂直画出一条直綫直到和 OO' 綫相交, 如图 1-6 所示。交点 O_1 就是所求电力綫的中心。

电軸間电場的研究可以直接轉为平行的圓柱形导綫的电場的研究。

假設将图 1-7 中的注有 1 和 2 的等位面用金屬圓柱体来代替, 并且假設現在在这些圓柱体的表面上帶有电荷。我們就可以来研究一个在另一个旁边的平行圓柱体間的电場。假設用金屬面来代替等位面 1 和 3 (图 1-7), 那末就可以来研究两个不同軸圓柱間的电場。

通常必須研究带电的平行圓柱体間的电場。在这种情形下必須求出电場和圓柱体电場相符合的电軸的位置。

在图 1-8 中表示出了当两个圓柱体为:

1) 一个在另一个外面地排列着和 2) 一个在另一个里面地排列着的时候确定电軸位置的图解方法。在第一种情况下(图 1-8, a) 将公切綫的一段 MN 作为直径, 在两切点之間画圓。这个圓和圓柱体的中心联綫的交点 A 和 B 确定了电軸的痕迹。这是因为画出的圓是經過 MN 切綫的切点的圓, 它和圓柱体表面成直角相交。因此 AOB 綫是电力綫。

正如从图 1-8(a) 中所看到的, 电軸和几何軸是不重合的。軸的不重合是因为在这种情形下, 电荷在圓柱体表面上分布得不均匀。电軸向电荷密度較大的一面移动。

在第二种情况下(图 1-8, b) 作內圓的切綫 CG_1E 和 DF_1F 而將切綫和外圓的交点用

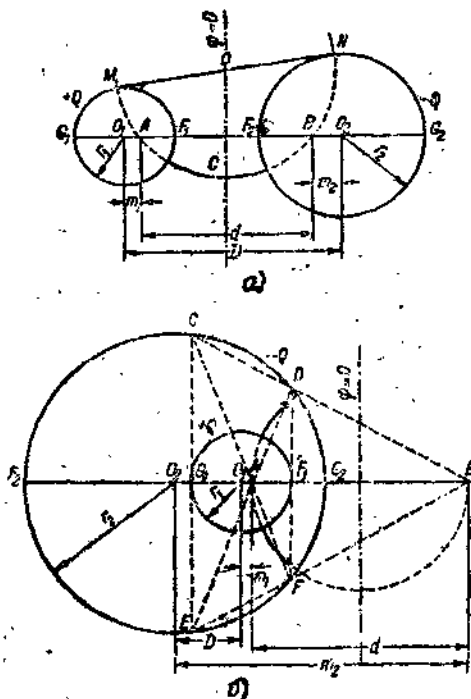


图 1-8 两个圆柱体的电轴A和B的寻求
a——一个在另一个外面地排列着；b——一个在另一个里面地排列着。

直线连接起来，这些连线与中心线的交点就确定了电轴A和B的痕迹。

求得电轴后，该两圆柱体间的电场的作图问题就归结为电轴的电场的作图问题了。

根据电轴到圆周上各点的距离的关系式，可以用代数法来确定电轴的位置。按照图1-8, a的符号，我们有：

$$\frac{BF_1}{AF_1} = \frac{BG_1}{AG_1} \text{ 或 } \frac{D-r_1-m_2}{r_1-m_1} = \frac{D+r_1-m_2}{r_1+m_1} \quad (1-18)$$

$$\frac{BF_2}{AF_2} = \frac{BG_2}{AG_2} \text{ 或 } \frac{r_2-m_2}{D-r_2-m_1} = \frac{r_2+m_1}{D+r_2-m_1} \quad (1-19)$$

对第二种情况(图1-8, b)，我们求得：

$$\frac{BF_1}{AF_1} = \frac{BG_1}{AG_1} \text{ 或 } \frac{m_2-D-r_1}{r_1-m_1} = \frac{m_2-D+r_1}{r_1+m_1} \quad (1-20)$$

$$\frac{BF_2}{AF_2} = \frac{BG_2}{AG_2} \text{ 或 } \frac{m_2+r_2}{m_1+D+r_2} = \frac{m_2-r_2}{r_2-D-m_1} \quad (1-21)$$

从这些式子中可以确定电轴相对于几何轴的位移 m_1 和 m_2 。知道了电轴的位置就可以确定电场中任一点的电场强度和圆柱体间的电容。事实上，根据(1-15)式我们求得这个或另一个圆柱体的电位的式子为：

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{BF_1}{AF_1};$$

$$U_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{BF_2}{AF_2}.$$

圆柱体间的电位差

$$U = U_1 - U_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{BF_1 \times AF_2}{AF_1 \times BF_2}.$$

由此，系统的电容

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{BF_1 \times AF_2}{AF_1 \times BF_2}} \quad (1-22)$$

在这种和另一种情况下最大电场强度将在 F_1 点处。这个电场强度的值可以由下面来确定。在 F_1 点处，由两圆柱体的电荷作用在单位正电荷上的力是同一方向的（沿中心线方向），因此

$$E_{F_1} = E_{\max} = E_A + (-E_B) = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{AF_1} + \frac{1}{BF_1} \right).$$

或

$$E_{\max} = \frac{QU}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{AF_1} + \frac{1}{BF_1} \right) = \frac{U}{\ln \frac{BF_1 \times AF_2}{AF_1 \times BF_2}} \left(\frac{1}{AF_1} + \frac{1}{BF_1} \right) \quad (1-23)$$

例1-1. 当 $U=6$ 千伏， $r_1=1$ 厘米， $r_2=3$ 厘米和 D (导线轴间的距离)=1.5厘米时，求圆柱形电容器(图1-8, b)的电容及电场强度。

求(1-20)和(1-21)式对于 m_1 和 m_2 的解，得，

$$m_1 = \frac{r_1^2}{m_2 - D}, \quad m_2 = \frac{r_2^2}{m_1 + D}.$$

将后二式对于 m_1 联解，得，

$$m_1^2 + m_1 \frac{D^2 + r_2^2 - r_1^2}{D} + r_1^2 = 0.$$

③ 原文为 $\frac{U}{\ln \frac{BF_1 \times AF_2}{AF_1 \times BF_2}} \left(\frac{1}{AF_1} + \frac{1}{BF_1} \right)$ ，——译者

代入原始数据后, 得 $m_1 = 3.54$ 和 $m_1 = 0.28$ 两个值。第一个值是不可取的, 因为在这个情况下电轴 A 将在第一个圆柱体之外, 这是不可能的。剩下第二个解: $m_1 = 0.28$ 厘米。

决定 m_2 :

$$m_2 = \frac{r_2^2}{m_1 + D} = \frac{3^2}{0.28 + 1.5} = 5.05 \text{ 厘米。}$$

当 $\epsilon = 1$ 时, 系统的电容

$$C = \frac{1}{2 \times 9 \times 10^{11} \times 2.3 \lg \frac{(m_2 - D - r_1)(r_2 + D + m_1)}{(r_1 - m_1)(m_2 + r_2)}}$$

$$= 0.75 \times 10^{-12} \text{ 法/厘米。}$$

如果圆柱的轴是重合的, 那么

$$C = \frac{1}{2 \times 9 \times 10^{11} \times 2.3 \lg \frac{r_2}{r_1}}$$

$$= 0.506 \times 10^{-12} \text{ 法/厘米。}$$

最大电场强度

$$E_{max} = \frac{U}{\ln \frac{(m_2 - D - r_1)(r_2 + D + m_1)}{(r_1 - m_1)(m_2 + r_2)}}$$

$$\times \left(\frac{1}{(r_1 - m_1)} + \frac{1}{m_2 - D - r_1} \right)$$

$$= 14.45 \text{ 千伏/厘米。}$$

当圆柱的轴重合时

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = 5.46 \text{ 千伏/厘米。}$$

假如将一种电荷安置在圆柱体的表面而另一种异号电荷安置在平面的导体上 (图 1-9); 那末在这种情况下电场将和两个平行

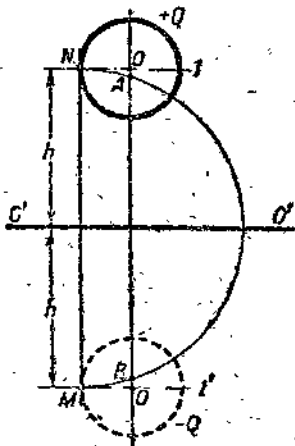


图 1-9 圆柱和平面相对, 下面的圆柱是上面的影象

带电圆柱体系统中的带电圆柱体和中性平面间的电场相同。在两圆柱体间画出电场。辅助圆柱 $1'$ 叫做圆柱 1 的影象。

1-4. 单相架空线

我们来研究一下双导线单相线路中的线路电容 C_{12} 和每个导线对地的电容 C_{11} 和 C_{22} (图 1-10)。这些电容叫做部分电容, 因为它们是线路总电容的一部分。事实上电容 C_{11} 和 C_{22} 经过地串联到导线间的电压上, 因此线路的总电容

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{11} C_{22}}{C_{11} + C_{22}}$$

如果 $C_{11} = C_{22}$, 那么

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{11}}{2} \quad (1-24)$$

因为在架空线中, 导线间的距离和导线对地的高度比它们的半径大得多, 所以经常可以认为几何轴和电轴相重合。

首先考察第一根导线的电荷所生的电场, 然后考察第二根导线的电荷所生的电场。为此在图 1-11 中除了在单位长度上带电 Q_1 和 Q_2 (瞬时值) 的单相线路的导线 1 和 2 之外又画出了它们的影象 $1'$ 和 $2'$, 影象的电荷是 $-Q_1$ 和 $-Q_2$ 。

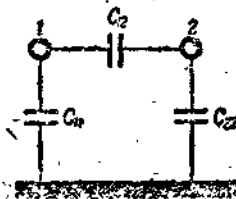


图 1-10 单相导线的部分电容



图 1-11 在地上部单相导线 1 和 2 及其影象 $1'$ 和 $2'$ 的布置

令导线的半径为 r , 而它们和地间的距离为 h_1 和 h_2 。由电荷 1 和 $1'$ 对第一根导线所生的部分电位 (瞬时值) [见 (1-15) 式] 为